

## Numerical Study of the Behavior of Shallow Box Tunnels Under the Influence of Seismic Loads in Dry Sandy Soils

Dr. Rami Ousta\*  
Ali Tawalo\*\*

(Received 16 / 7 / 2020. Accepted 27 / 8 / 2020)

### □ ABSTRACT □

This paper presents studying the internal dynamic forces of the shallow box tunnels in dry sandy soils resulting from the seismic loads by adopting a two-dimensional numerical analysis according to the FEM method. The matter was modeled by adopting the plane strain case, flexible-with Rayleigh damping behavior for surrounding soil and elastic behavior for tunnel, it was found that the internal forces increase with increase width of the tunnel like for the thickness of the section and with increased density of the surrounding soil.

**Keywords:** shallow box tunnels, dry sandy soils, seismic loads.

---

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

\*\* Master Student, Geotechnical Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Lattakia, Tishreen University, Syria.

## دراسة عددية لسلوك الأنفاق الصندوقية السطحية تحت تأثير الحمولات الزلزالية في التراب الرملية الجافة

د. رامي اسطة\*

علي طوالو\*\*

(تاريخ الإيداع 16 / 7 / 2020. قُبِلَ للنشر في 27 / 8 / 2020)

### □ ملخص □

تتناول هذه المقالة دراسة القوى الديناميكية الداخلية للأنفاق الصندوقية السطحية المنفذة في التراب الرملية الجافة الناتجة عن الحمولات الديناميكية عن طريق تحليل عددي ثنائي الأبعاد حسب طريقة FEM، حيث تم نمذجة المسألة باعتماد الحالة التشوهية المستوية وسلوك مرن مع تخامد ريليه بالنسبة للتربة المحيطة ومرن بالنسبة لمادة النفق، وتم التوصل إلى أنّ القوى الداخلية تزداد بازدياد عرض النفق كما بالنسبة لسماكة المقطع وكثافة التربة المحيطة بالنفق.

**الكلمات المفتاحية:** أنفاق صندوقية سطحية، تراب رملية جافة، حمولات زلزالية.

\* مدرس \_ قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية \_ جامعة تشرين - اللاذقية \_ سورية.  
\*\* طالب ماجستير \_ قسم الهندسة الجيوتكنيكية \_ كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية \_ سورية.

**مقدمة:**

تتعدى أهمية الأنفاق كونها عنصر أساسي في أنظمة النقل إلى كونها عنصر فعّال في الكثير من المشاريع الخدمية (مثلاً: مشاريع استجرار المياه إلى محطات توليد الطاقة)، وإن الحاجة المتزايدة في الآونة الأخيرة لتوسيع شبكات النقل أدى إلى التوجه بشكل خاص نحو الأنفاق على اعتبار أنّ مثل هذه المنشآت تقلل من الازدحام في المدن الكبيرة بالإضافة إلى أنها توفر في الوقت وتسهل في حركة البضائع بين المدن فكانت الأنفاق ثورة في مجال النقل، ولكن وبما أن التخطيط السليم لأي مشروع سيؤدي بطبيعة الحال إلى استثمار أمثل له وعمر أطول فلا بد من الإحاطة بجميع العوامل التي يمكن أن تؤثر على سلوك هذه المنشآت من أجل التصميم الأمثل لها، ولعل من أهم هذه العوامل هو الحمولات الديناميكية الناتجة عن الزلازل.

إنّ الزلزال بحد ذاته هو عبارة عن مجموعة من الأمواج (حجمية وسطحية) التي تنتشر في طبقات التربة وتتبعس وتتكرس على الحدود الفاصلة بين هذه الطبقات وبالتالي يمكن وصف الزلزال في مجال الهندسة المدنية بأنه حمولة معقدة نلجأ إلى تبسيطها باستخدام طرق متعددة ومن هذا المنطلق يمكن اعتبار السلوك الزلزالي للأنفاق الصندوقية السطحية سلوك معقد إلى حد ما حيث أنه بالإضافة إلى تعقيدات الحمولات الديناميكية التي سيتلقاها النفق أثناء الزلزال هنالك الكثير من العوامل التي تؤثر على هذا السلوك (كثافة التربة أو الصخر المحيط، أبعاد مقطع النفق، عدد فتحات النفق، صلابة مقطع النفق، بارامترات الحركة الزلزالية، ....) وبالتالي فإنّ الفهم الصحيح لتأثير هذه البارامترات يعد من أساسيات مراحل التخطيط الناجح لمشاريع الأنفاق وكذلك التصميم ومن شأنّ التنبؤ الموثوق بالقوى الديناميكية الداخلية المتولدة في هذه الأنفاق أن يوفر كلفة اقتصادية كبيرة من خلال الضبط السليم لكميات حديد التسليح والبيتون اللازمين للتصميم السليم لهذه الأنفاق.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف هذا البحث إلى دراسة سلوك الأنفاق الصندوقية السطحية المنفذة في الترب الرملية الجافة تحت تأثير الحمولات الزلزالية عن طريق دراسة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة باعتماد تحليل عددي ثنائي الأبعاد حسب طريقة FEM من خلال دراسة أهم البارامترات المؤثرة على هذه القوى، وهي:

- عرض النفق.
- سماكة المقطع.
- كثافة التربة المحيطة بالنفق.

يساهم هذا البحث في توسيع فهمنا لسلوك الأنفاق الصندوقية السطحية تحت تأثير الحمولات الزلزالية في الترب الرملية الجافة وإيجاد صيغ مبسطة منطقية من التحليل لتقييم الأثر الزلزالي لها، كما ويساهم هذا البحث في إغناء البحث العلمي فيما يتعلق بالأنفاق الصندوقية من أجل القيام بأبحاث لاحقة مكتملة لهذا البحث حيث يمكن ومن خلال استخدام نتائج هذه الأبحاث توفير في الكلفة وزمن التنفيذ للأنفاق الصندوقية.

**منهجية البحث:**

يعتمد البحث على المنهج التحليلي المقارن ويتكون من مرحلتين أساسيتين:

- a. إجراء نمذجة عددية لتجربة طرد مركزي أجريت على نفق صندوقي سطحي موجود في تربة رملية جافة بهدف معايرة النموذج العددي والتحقق من صلاحية النتائج عبر مقارنة النتائج المخبرية مع التنبؤات العددية.
- b. إجراء دراسة بارامترية لأهم البارامترات المؤثرة على القوى الداخلية المتولدة نتيجة الحملات الديناميكية.
- الدراسات والأبحاث السابقة:

أضحى السلوك الزلزالي للأنفاق موضع اهتمام العديد من الباحثين وخاصة في الآونة الأخيرة بعد الضرر الذي لحق بالكثير من الأنفاق نتيجة الزلازل فكان لا بد من تعميق الدراسة ومحاولة فهم لهذا السلوك، وفيما يلي بعض الدراسات السابقة حول السلوك الزلزالي للأنفاق:

- ✓ **Milind et al (2018) & A. Lakirouhani et al (2015) & Peyman et al (2016)**  
أكدوا على أن زيادة سماكة قشرة النفق سوف تؤدي لزيادة في قيمة القوى الداخلية.

جدول رقم (1): تأثير سماكة المقطع على القوى الداخلية بالنسبة للسقف والجدار (Peyman et al (2016))

Thickness	Roof			
	(m) Displacement	(KN.m/m) Bending moment	(KN/m) Shear force	(KN/m) Axial force
0.3	0.26	-442	-609	-253
0.4	0.26	-457	-636	-249
0.5	0.26	-539	-661	-247
Thickness	Wall			
	(m) Displacement	(KN.m/m) Bending moment	(KN/m) Shear force	(KN/m) Axial force
0.3	0.26	-441	-340	-659
0.4	0.26	-457	-347	-682
0.5	0.26	-539	-353	-672

- ✓ **A. Lakirouhani et al (2015)** أكدوا على أن زيادة عرض النفق سوف يؤدي إلى زيادة القوى الداخلية المتولدة.

جدول رقم (2): تغير عزم الانعطاف المتولد في قشرة النفق بتغير عرض النفق

Bending moment in dynamic mode to static mode	Bending moment in dynamic mode (kN-m)	Bending moment in static mode (kN-m)	t (m)	D (m)	H (m)	W (m)
7.3	3408	467.9	1	10	6	8
5.6	4300	761.8	1	10	6	10
4.5	5591	1234	1	10	6	12
2.6	5100	1935	1	10	6	14
2.2	6196	2857	1	10	6	16

- ✓ **Milind et al (2018) & Lanzano et al (2014)** درسوا تأثير كثافة التربة المحيطة وتوصلوا إلى أن زيادة كثافة التربة سيؤدي إلى زيادة في قيمة القوى الداخلية المتولدة في قشرة النفق.
- النمذجة العددية:

(1) البرنامج المستخدم:

تم في هذا البحث استخدام برنامج ABAQUS 6.14 وهو برنامج واسع الاستخدام يستخدم طريقة العناصر المنتهية من أجل التحليل العددي ثنائي وثلاثي الأبعاد لجميع أنواع المسائل الهندسية ويتمتع بمجموعة من الخيارات التي يتميز

فيها عن غيره من البرامج الهندسية وخصوصاً تلك المختصة بمسائل الهندسة الجيوتكنيكية بالإضافة إلى أنه برنامج واضح وسهل الاستخدام.

## (2) معطيات تجربة الطرد المركزي:

بهدف التحقق لاحقاً من صلاحية نتائج التحليل العددي بطريقة FEM تم إجراء نمذجة عددية بطريقة العناصر المنتهية لتجربة الطرد المركزي (centerifuge test) التي نُفذت من قبل (Tsinids et al (2016)<sup>(4)</sup> حيث قدموا نموذج مخبري لنفق صندوقي وقاموا بإجراء تجربة الطرد المركزي ثم قاموا بنمذجة التجربة باستخدام برنامج ال (ABAQUS). تم تنفيذ تجربة الطرد المركزي تحت تسارع طرد مركزي مقداره 40g وبالتالي يكون Scale factor, N=40 وتطبيق الحركات الزلزالية عند قاعدة الموديل. أبعاد الوعاء الذي ستوضع فيه التربة. (360\*800) mm أما بالنسبة إلى التربة المستخدمة فهي تربة رملية (Fontainebleau NE 34 sand) كثافتها النسبية  $D_r=70\%$  والجدول (3) يوضح الخواص الفيزيائية للتربة المستخدمة:

جدول رقم (3) الخواص الفيزيائية للتربة المستخدمة في التجربة

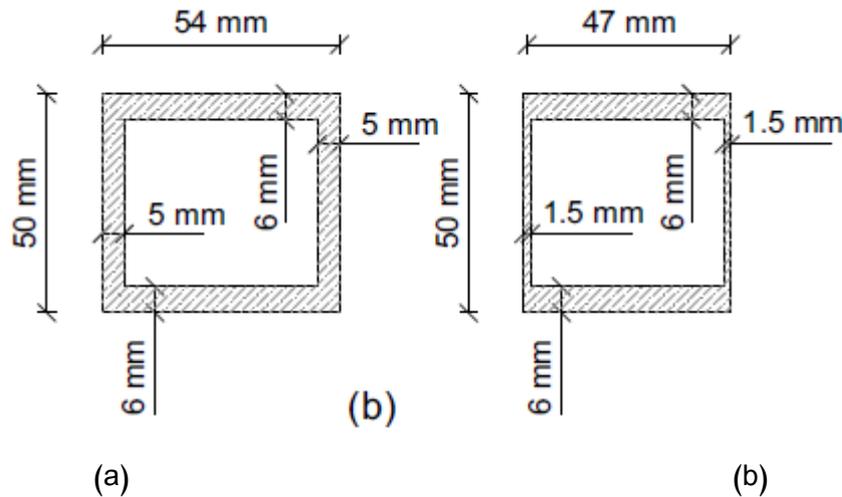
	$\rho_s(g/cm^3)$	$e_{max}$	$e_{min}$	$d_{50}(mm)$	$\phi(^{\circ})$
Fontainebleau NE34 sand	2.64	0.860	0.550	0.200	33

نموذج النفق صنع من الألمنيوم (A aluminum alloy 2017)، والخواص الميكانيكية لمادة نموذج النفق ملخصة في الجدول التالي:

جدول رقم (4) الخواص الميكانيكية لمادة نموذج النفق

	Unit weight, $\gamma (kN/m^3)$	Elastic modulus, $E (Gpa)$	Poisson ratio, $\nu$	Yield strength, $f_y(Mpa)$
Tunnel models	2.7	71	0.33	400

تم تنفيذ التجربة باستخدام نوعين من الأنفاق الصندوقية (صلبة ومرنة)، نموذج النفق المرن كان بأبعاد (47x50) mm مع سماكة جدران 1.5 mm وسماكة كل من بلاطتي السقف والأرضية 6 mm، أما النفق الصلب فكان بأبعاد (50x54) mm مع سماكة جدران 5mm وسماكة كل من بلاطتي السقف والأرضية 6mm.



الشكل رقم (1) أبعاد النفقين المستخدمين في التجربة (a نفق صلب، b نفق مرن)

بالنسبة للحمولات الديناميكية المطبقة تم تطبيق أربع حركات ديناميكية على قاعدة النموذج، ثلاثة منها كانت بالاعتماد على السجل الزمني لزلزال Northridge 1994، حيث تم تغيير ذروة التسارع إلى 0.1g، 0.2g، 0.3g، أما الحركة الرابعة فهي عبارة عن حمولة ديناميكية جيبيية بتردد 85 HZ ومطال 0.3g. (3) النموذج العددي:

تم تحويل أبعاد الموديل والنفق وبارامترات الحركة الزلزالية من التجربة المخبرية إلى الواقع وفق الجدول التالي بالاعتماد على scale factor, N=40:

جدول رقم (5) تحويل قيم التجربة إلى الواقع

القيمة في الواقع	Scale factor	القيمة في التجربة
32	40	0.8
14.4	40	0.36
2.16	40	0.054
2	40	0.05
0.2	40	0.005
0.24	40	0.006
2.125	40	85

تمت نمذجة النفق باعتماد نفق مرن، وعناصر beam خطية بعقدتين وبالتالي تكون الأبعاد في الواقع كما في الجدول رقم (5). أما بالنسبة لبارامترات الحركة الزلزالية تمت النمذجة بالاعتماد على الحمولة الديناميكية EQ4 والتي تمثل حمولة هارمونية بتردد 85 HZ ومطال 0.3g (المطال محوّل من المخبري للواقع). بالنسبة للتربة المحيطة بالنفق تمت النمذجة باعتماد سلوك خطي مرن مع تخامد.

يوضح الجدول (6) الخواص الميكانيكية للتربة المعتمدة في النمذجة العددية:

Stiffness reduction	0.70, 0.20
Factors a,b	0.80, 0.25
$\rho$ ( $t/m^3$ )	1.612
Poisson ratio, $\nu$	0.28
Rayleigh damping, D(%)	24
Friction angle, $\phi$ ( $^\circ$ )	33
Dilatancy angle, $\Psi$ ( $^\circ$ )	0
Cohesion, C (kPa)	1

جدول رقم (6) الخواص الميكانيكية للتربة المعتمدة في النمذجة العددية

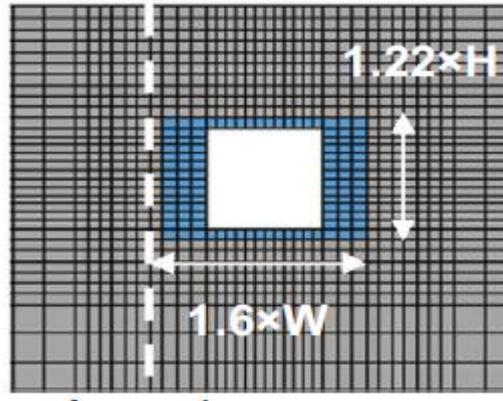
من أجل مراعاة تغير خصائص التربة بين المنطقة القريبة من النفق والمنطقة البعيدة عن النفق تم إدخال عوامل صلابة مختلفة للمنطقتين عن طريق أخذ نسبة من قيمة  $G_{max}$ .

يعطى معامل صلابة التربة على القص للمنطقة القريبة من النفق بالعلاقة التالية  $G = bG_{max}$

ومعامل صلابة التربة على القص للمنطقة البعيدة عن النفق بالعلاقة التالية  $G = aG_{max}$

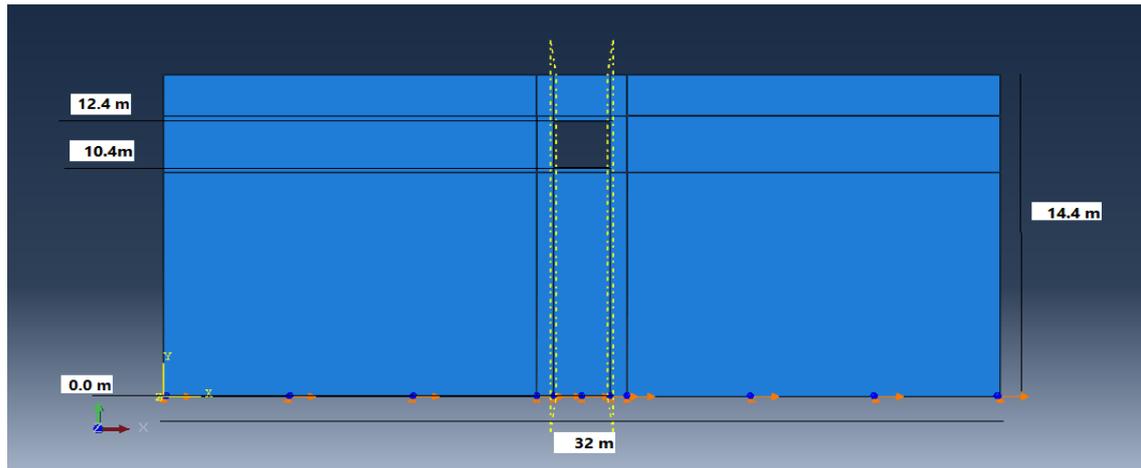
حيث  $a$  و  $b$  معاملات موضحة في جدول الخواص الميكانيكية المعتمدة في النمذجة وتم الحصول عليها نتيجة تحليل بارامتري شامل من أجل مطابقة نتائج النمذجة العددية مع النتائج التجريبية.

بالنسبة لأبعاد المنطقة القريبة من النفق فهي كالتالي:

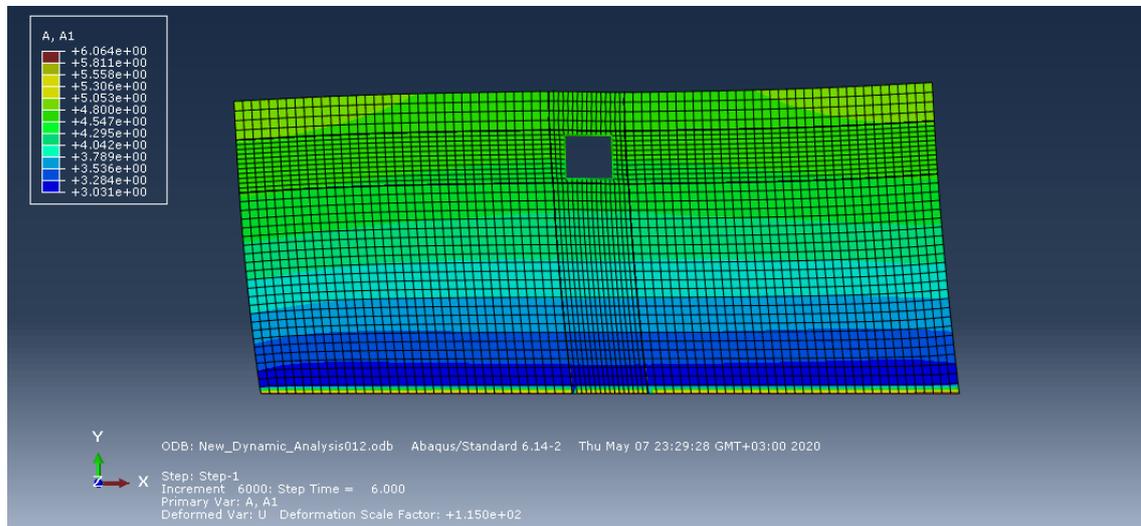


الشكل رقم (2) أبعاد المنطقة القريبة من النفق

تمت نمذجة الموديل بالاعتماد على شروط مطابقة لشروط التجربة وهي حدود صلابة في قاعد الموديل، والأطراف حرة الحركة.



الشكل رقم (3) النموذج العددي المعتمد في التحليل



الشكل رقم (4) التسارع الناتج عن الحركة الزلزالية

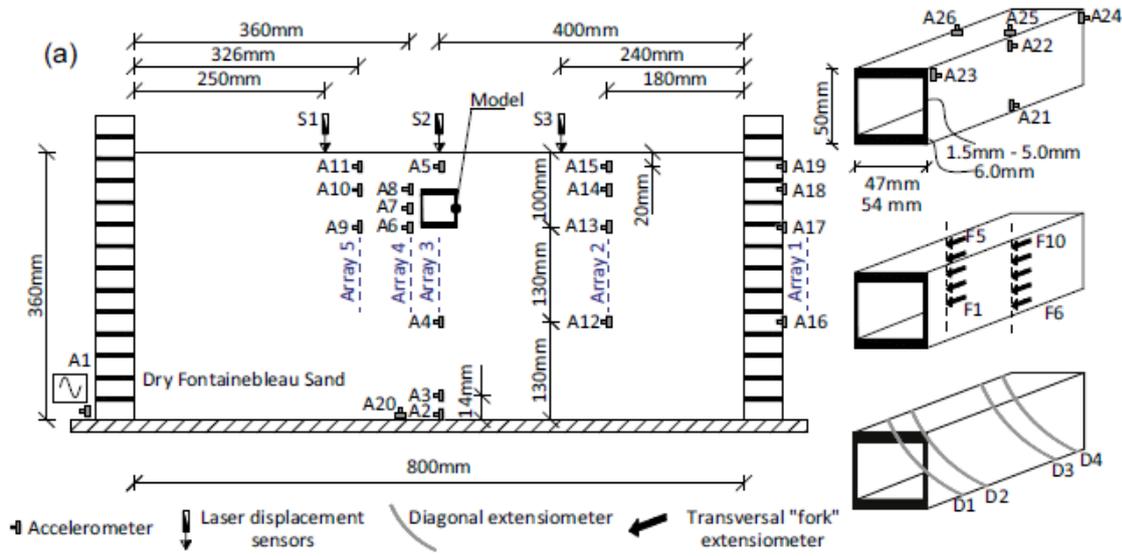


الشكل رقم (5) الانتقالات الأفقية في قشرة النفق نتيجة الحركة الزلزالية

## النتائج والمناقشة:

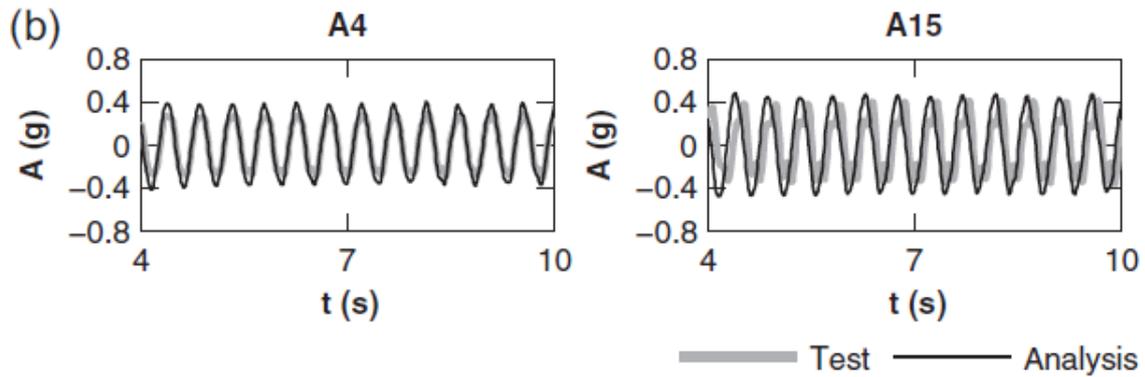
### 1) معايرة النموذج والتأكد من صلاحية النتائج:

بهدف التحقق من دقة النتائج التي تم التوصل إليها تم مقارنة قيم التسارعات المقاسة في تجربة الطرد المركزي مع قيم التسارعات المحسوبة من النموذج العددي باستخدام قانون مرن مع تخامد ريليه. يوضح الشكل رقم (6) التخطيط النموذجي للموديل المخبري



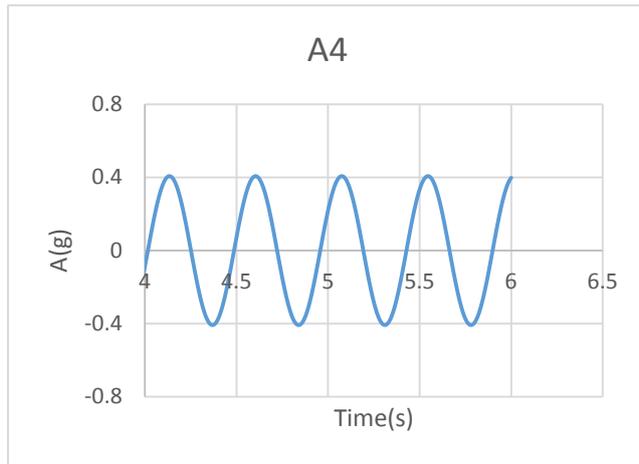
الشكل رقم (6) التخطيط النموذجي للموديل المخبري

يوضح الشكل رقم (7) السجل الزمني للتسارع عند الأكسيلومتر A4 و A15:

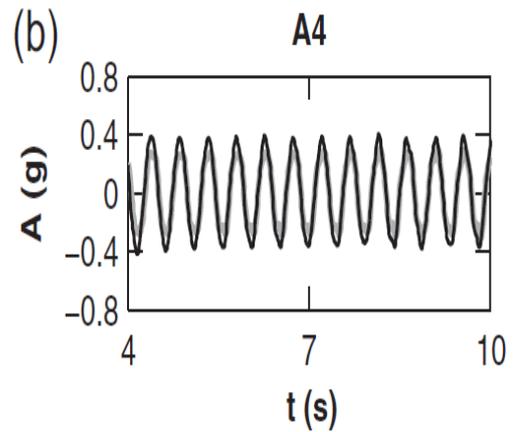


الشكل رقم (7) السجل الزمني للتسارع المحسوب من تجربة الطرد المركزي عند الأكسيلومتر A4 & A15

يوضح الشكل رقم (8) مقارنة بين السجل الزمني للتسارعات الأفقية في كل من النموذج العددي والمشكل والنموذج المخبري عند الأكسيلومتر A4.



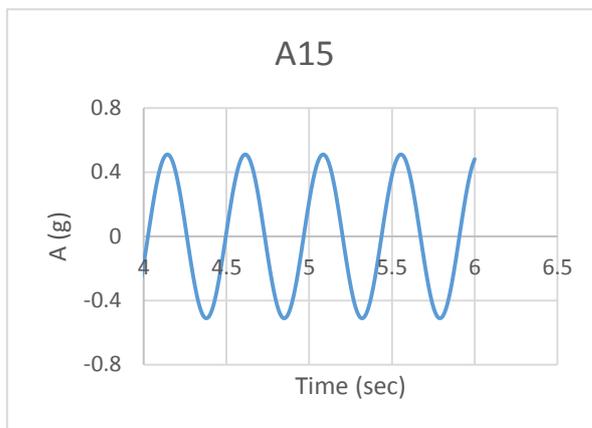
(a)



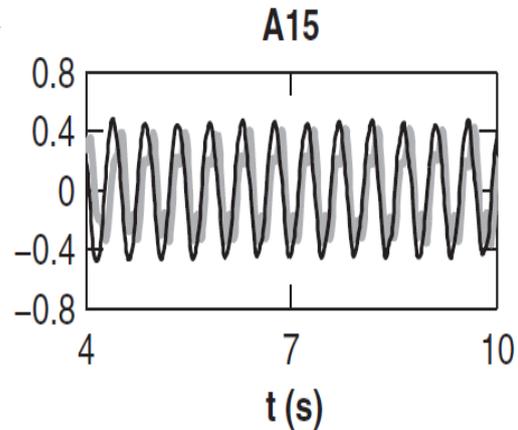
(b)

الشكل رقم (8) السجل الزمني للتسارعات الأفقية عند الأكسيلومتر A4 (b) نتائج تجربة الطرد المركزي، a نتائج الموديل العددي)

يوضح الشكل رقم (9) مقارنة بين السجل الزمني للتسارعات الأفقية في كل من النموذج العددي والمشكل والنموذج المخبري عند الأكسيلومتر A15



(a)

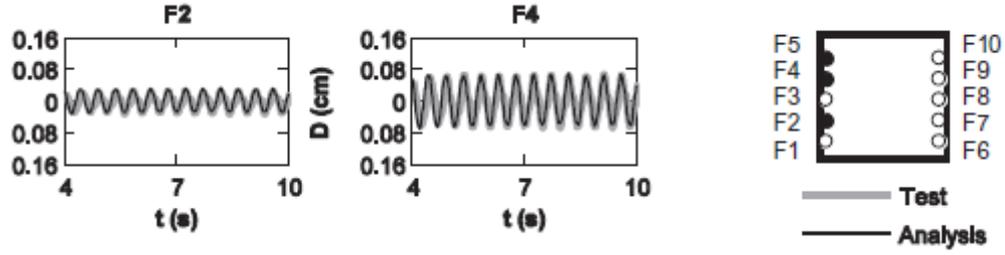


(b)

الشكل رقم (9) السجل الزمني للتسارعات الأفقية عند الأكسيلومتر A15 (b) نتائج تجربة الطرد المركزي، a نتائج الموديل العددي)

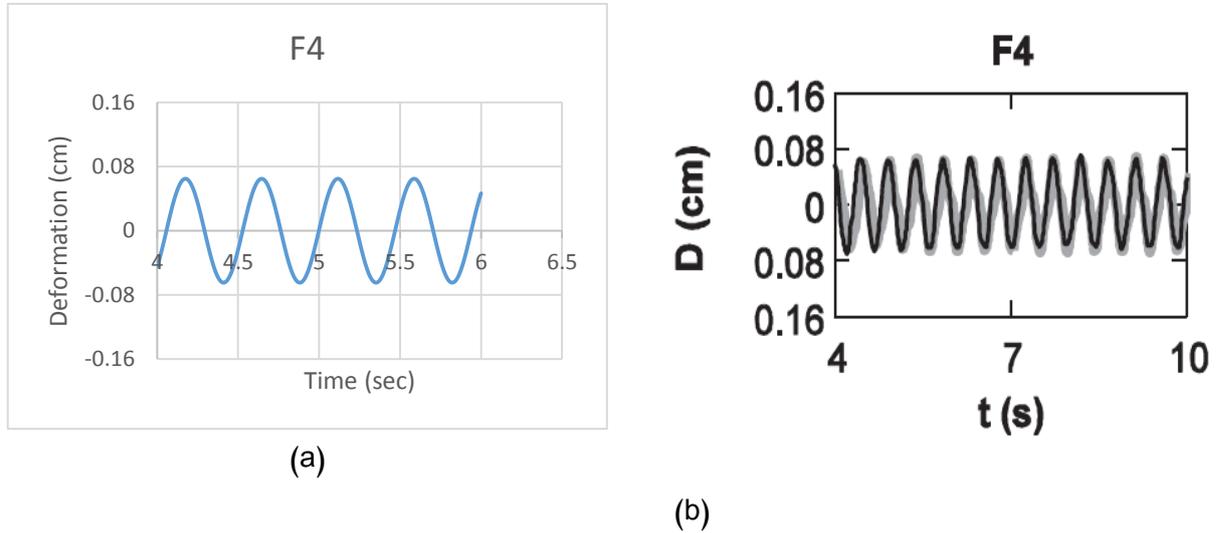
بالنظر إلى الشكلين (8) و (9) نلاحظ وجود توافق في قيم التسارعات الناتجة ما بين تجربة الطرد المركزي والنموذج العددي المشكل.

يوضح الشكل رقم (10) السجل الزمني للتشوهات بالنسبة للجدار اليساري لموديل النفق.



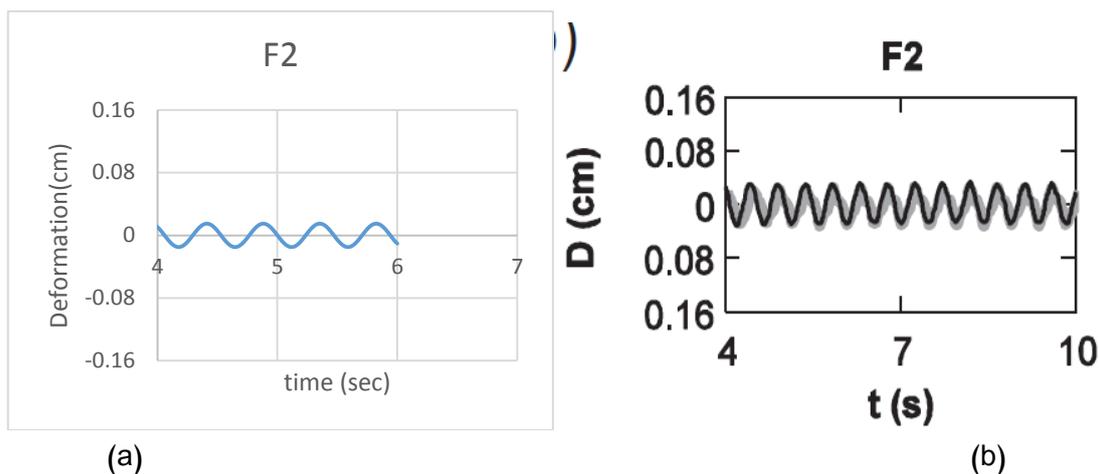
الشكل رقم (10) السجل الزمني للتشوهات بالنسبة للجدار اليساري لموديل النفق

يوضح الشكل رقم (11) مقارنة بين السجل الزمني للتشوهات بالنسبة للجدار اليساري للنفق في كل من النموذج العددي المشكل والنموذج المخبري عند F4.



الشكل رقم (11) السجل الزمني للتشوهات بالنسبة للجدار اليساري للنفق عند F4 (b) نتائج تجربة الطرد المركزي، (a) نتائج الموديل العددي

يوضح الشكل رقم (12) مقارنة بين السجل الزمني للتشوهات بالنسبة للجدار اليساري للنفق في كل من النموذج العددي المشكل والنموذج المخبري عند F2.



الشكل رقم (12) السجل الزمني للتشوهات بالنسبة للجدار اليساري للنفق عند F2 (b) نتائج تجربة الطرد المركزي، (a) نتائج الموديل العددي)

بالنظر إلى الشكلين (11) و (12) نلاحظ وجود توافق في قيم التشوهات الأفقية الناتجة في قشرة النفق ما بين تجربة الطرد المركزي والنموذج العددي المشكل.

## 2) الدراسة البرامترية:

تم إجراء دراسة بارامترية من أجل دراسة تأثير أهم العوامل والبارامترات المؤثرة على القوى الديناميكية المتولدة نتيجة الحركة الزلزالية على ضوء أهداف هذا البحث وذلك على نماذج عددية مختلفة بعد اعتماد موديل مرجعي بأبعاد  $m (300 \times 14.4)$  وباستخدام عناصر لا نهائية بخمس عقد وعناصر منتهية مربعة بثمان عقد وحمولة زلزالية مفروضة ومعبر عنها كإنتقال  $0.017 \text{ m}$  ويتردد مساو للتردد الأساسي للحقل الحر للموديل  $1.19 \text{ Hz}$  أما النفق فقد تم اعتماد نفق Pedestrian and cyclist subway Didcot, Oxfordshire, UK من البيتون المسلح بأبعاد  $m (5.7, 3.6, 0.57)$  الجدولان (7, 8) يوضحان خصائص التربة الرملية ومادة النفق المستخدمة في الموديل المرجعي.

الجدول رقم (7) خصائص التربة المستخدمة في الموديل المرجعي

اسم البارامتر	الكتلة الحجمية $kg/m^3$	معامل يونغ $Pa$	معامل بواسون	$\alpha$	$\beta$
القيمة	1470	$18 \times 10^6$	0.3	0.374	$6.69 \times 10^{-3}$

الجدول رقم (8) خصائص مادة النفق المستخدمة في الموديل المرجعي

اسم البارامتر	الكتلة الحجمية $kg/m^3$	معامل يونغ $Pa$	معامل بواسون
القيمة	2500	$30 \times 10^9$	0.2

• تأثير عرض النفق:

نظراً لأهمية عرض النفق وتأثيره على القوى الداخلية المتولدة نتيجة التحميل الديناميكي تم إجراء عدد من الحسابات على النموذج المشكل مع تغيير قيم (w) من (5.9 – 7.92) m مع ثبات بقية البارامترات، ويبين الجدول التالي تأثير بارامتر عرض النفق على القوى الداخلية المتولدة:

البارامتر	عرض النفق (m)	$M_{max}$ Kn.m/m	$N_{max}$ Kn/m
القيمة	5.9	477	300
	6.5	510	321
	7.2	548	344
	7.92	585	366

الجدول رقم (9) تأثير بارامتر عرض النفق على القوى الداخلية المتولدة في النفق

نلاحظ من الجدول السابق ازدياد قيمة عزم الانعطاف بنسبة 6.9% عند زيادة عرض النفق بنسبة 10.2% وبنسبة 14.9% عند زيادة عرض النفق بنسبة 22% وبنسبة 22.6% عند زيادة عرض النفق بنسبة 34.2%. كما ونلاحظ ازدياد قيمة القوة الناطمية بنسبة 7% عند زيادة عرض النفق بنسبة 10.2% وبنسبة 14.7% عند زيادة عرض النفق بنسبة 22% وبنسبة 22% عند زيادة عرض النفق بنسبة 34.2%. إن سبب هذه الزيادة تعود إلى أن زيادة عرض النفق سوف يؤدي إلى زيادة ضغط التربة المطبق على قشرة النفق وبالتالي زيادة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة.

• تأثير سماكة مقطع النفق:

بهدف دراسة تأثير سماكة مقطع النفق وتأثيره على القوى الداخلية المتولدة نتيجة التحميل الديناميكي تم إجراء عدد من الحسابات على النموذج المشكل مع تغيير قيم (t) من (0.57 – 0.98) m مع ثبات بقية البارامترات، ويبين الجدول التالي تأثير بارامتر سماكة مقطع النفق على القوى الداخلية المتولدة:

البارامتر	سماكة مقطع النفق (m)	$M_{max}$ Kn.m/m	$N_{max}$ Kn/m
القيمة	0.57	477	300
	0.68	499	312
	0.82	523	325
	0.98	548	338

الجدول رقم (10) تأثير بارامتر سماكة مقطع النفق على القوى الداخلية المتولدة في النفق

نلاحظ من الجدول السابق ازدياد قيمة عزم الانعطاف بنسبة 4.6% عند زيادة سماكة مقطع النفق بنسبة 19.3% وبنسبة 9.6% عند زيادة سماكة مقطع النفق بنسبة 43.9% وبنسبة 14.9% عند زيادة سماكة مقطع النفق بنسبة 71.9%. نلاحظ من الجدول السابق ازدياد قيمة القوة الناطمية المتولدة بنسبة 4% عند زيادة سماكة مقطع النفق بنسبة 19.3% وبنسبة 8.3% عند زيادة سماكة مقطع النفق بنسبة 43.9% وبنسبة 12.7% عند زيادة سماكة مقطع النفق بنسبة 71.9%.

إنَّ سبب هذه الزيادة تعود إلى أنَّ زيادة سماكة مقطع النفق سوف يؤدي إلى زيادة في صلابته وبالتالي زيادة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة.

• تأثير كثافة التربة المحيطة بالنفق:

نظراً لأهمية كثافة التربة المحيطة بالنفق وتأثيره على القوى الداخلية المتولدة نتيجة التحميل الديناميكي تم إجراء عدد من الحسابات على النموذج المشكل مع تغيير قيم  $(\rho)$  من  $(1470 - 1840) Kg/m^3$  وقيم معامل يونغ ومعامل بواسون بما يتناسب مع الكتلة الحجمية وثبات بقية البارامترات.

الجدول رقم (11) بارامترات التربة الرملية المستخدمة (adapted from Das 1994)

معامل بواسون	معامل يونغ E	الكتلة الحجمية $\rho$	حالة الرمل
$\nu$	Pa	$Kg/m^3$	
0.3	$18 * 10^6$	1470	رمل مخلخل
0.3	$40 * 10^6$	1655	رمل متوسط الكثافة
0.35	$51.5 * 10^6$	1840	رمل كثيف

وبيين الجدول التالي تأثير بارامتر كثافة التربة المحيطة بالنفق على القوى الداخلية المتولدة:

البارامتر	حالة الرمل	$M_{max}$	$N_{max}$
		$Kn.m/m$	$Kn/m$
القيمة	مخلخل	477	300
	متوسط الكثافة	167	106
	كثيف	180	116

الجدول رقم (12) تأثير بارامتر كثافة التربة المحيطة بالنفق على القوى الداخلية المتولدة في النفق

تم ملاحظة تغير في قيمة القوى الداخلية مع ازدياد كثافة التربة المحيطة حيث انخفض قيمة عزم الانعطاف بنسبة 64.98% بالنسبة للرمل متوسط الكثافة وبنسبة 62.26% بالنسبة للرمل الكثيف وقيمة القوة الناطمية انخفضت بنسبة 64.67% بالنسبة للرمل متوسط الكثافة وبنسبة 61.33% بالنسبة للرمل الكثيف، ويرجع ذلك إلى أنَّ زيادة كثافة التربة الرملية المحيطة سوف يؤدي إلى زيادة في ضغط الأرض الديناميكي المتولد وهذا ما يفسر ازدياد قيمة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة بالنسبة للرمل المتوسط الكثافة والرمل الكثيف أما الرمل المخلخل لم يظهر تأثير ضغط الأرض الديناميكي وذلك بسبب ظاهرة الطنين (تردد الحمولة الزلزالية الهارمونية مساوٍ للتردد الأساسي للحقل الحر للموديل).

الاستنتاجات والتوصيات:

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

**الاستنتاجات:**

1. بينت المقارنة بين نتائج التحليل العددي باستخدام طريقة FEM ونتائج القياسات التجريبية من تجربة الطرد المركزي تقارباً جيداً بالنسبة لقيم التسارعات وتشوهات المقطع للنفق.
2. بينت الدراسة البارامترية أن زيادة عرض النفق سوف يؤدي إلى زيادة في قيمة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة.
3. إن زيادة سماكة المقطع للنفق ستؤدي إلى زيادة في قيمة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة.
4. إن زيادة كثافة التربة المحيطة بالنفق سيؤدي إلى زيادة في قيمة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة نتيجة زيادة ضغط الأرض الديناميكي المتولد بسبب الزلزال كما أن كثافة التربة المحيطة بالنفق تلعب دور أساسي في قيمة التردد الأساسي للحقل الحر وبالتالي يجب الأخذ بعين الاعتبار عند تنفيذ الأنفاق الابتعاد قدر الإمكان عن التوافق بين التردد المسيطر المتوقع للحمولة الزلزالية والتردد الأساسي للحقل الحر (تجنباً لظاهرة الطنين).

**التوصيات:**

- يوصى بإجراء المزيد من الأبحاث مستقبلاً تأخذ بعين الاعتبار توسيع موضوع البحث في الاتجاهات التالية:
1. دراسة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة من خلال نماذج ثلاثية الأبعاد بالنسبة للأنفاق القليلة الطول.
  2. دراسة بارامترات جديدة تخص الحركة الديناميكية المطبقة وتأثيرها على القوى الداخلية الديناميكية المتولدة.
  3. دراسة أنواع أخرى من الأنفاق (دائرية، بيضوية، نعل فرس ، ...).
  4. دراسة القوى الديناميكية الداخلية المتولدة من خلال نماذج تعتمد السلوك اللدن للتربة المحيطة.

**References:**

1. P. Yeganeh; P. Yeganeh." Evaluation of Seismic Behavior in Defensive Tunnels with Oval and Rectangular Cross-Sections in Loose and Dense Soils", Journal of Global Pharma Technology, 2016; 12(8):182-189.
2. A. Lakirouhani, Sh. Valioskooyi. "Seismic Analysis of Rectangular Tunnels (Cut and Cover Method), Soil-Structure Interaction", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 49(1) (2017) 45-48.
3. G. Lanzano, et al." Experimental and numerical study on circular tunnels under seismic Loading", European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2014.
4. G. Tsinids, et al." Seismic response of box-type tunnels in soft soil: Experimental and numerical investigation", Tunneling and Underground Space Technology 59 (2016) 199-214.
5. G. Tsinids, et al." EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE SEISMIC BEHAVIOR OF RECTANGULAR TUNNELS IN SOFT SOILS", 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 12-14 June 2013.