

## دراسة عددية ثلاثية الأبعاد للسلوك الزلزالي وللتأثير المتبادل " تربة - أوتاد - منشأ " بطريقة العناصر المنتهية

الدكتور رامي اسطة\*

الدكتور مالك حسن\*\*

تاريخ الإيداع 4 / 12 / 2013. قُبِلَ للنشر في 16 / 3 / 2014

### □ ملخص □

يتناول هذا البحث دراسة سلوك الأوتاد تحت تأثير الحمولات الزلزالية من خلال نمذجة فراغية (3D) باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) - برنامج (ABAQUS) مع إجراء دراسة متغيرات لأهم المعاملات المؤثرة على الانتقالات والقوى الداخلية المتولدة في الأوتاد. لقد تم إنجاز البحث على مرحلتين: في المرحلة الأولى تم دراسة حالة وتد منفرد (حالة مرجعية)، حيث تم دراسة سلوك وتد منفرد يسند منشأ تم نمذجته بجملة ذات درجة حرية واحدة. أظهرت نتائج الدراسة البارامترية أن وجود المنشأ يسبب تطبيق حمولة كبيرة في الجزء العلوي من الوتد ناتجة عن أثر العطالة ويكون طاغياً على الأثر الحركي، وأن قوى العطالة تزداد بزيادة كتلة المنشأ، وعندما يكون التردد الأساس للمنشأ قريب من تردد الحمولة الزلزالية. أما المرحلة الثانية فتناولت دراسة حالة مجموعة أوتاد، حيث تم دراسة تأثير عدد الأوتاد وتباعدها ومواقعها على القوى الداخلية والانتقالات المتولدة في الأوتاد، وقد أظهرت نتائج الدراسة البارامترية لهذه المرحلة من البحث أن زيادة عدد الأوتاد في المجموعة تسبب زيادة كبيرة للقوى الداخلية المتولدة في رأس الوتد وتناقصاً طفيفاً لهذه القوى في الجزء الوسطي من الوتد، كما لوحظ عدم توزع الحمولات الزلزالية بشكل متساوٍ على جميع الأوتاد فالأوتاد الركنية تخضع لأكبر قوى بينما الأوتاد الوسطية تخضع لأقل قوى.

**الكلمات المفتاحية:** التأثير المتبادل "منشأ-التربة"-أوتاد-طريقة العناصر المنتهية-الحمولات الزلزالية-السلوك - التأثير السيسمي.

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

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

## 3D-FEM-Analysis on the Seismic Behavior of Foundation Piles and Soil Structure Interaction

Dr. Rami Ousta\*  
Dr. Malek Hasan\*\*

(Received 4 / 12 / 2013. Accepted 16 / 3 / 2014)

### □ ABSTRACT □

This research deals with the study of the behavior of piles under the influence of seismic loads through (3D) modeling using FE-Method-program (ABAQUS), with special reference to the most important parameters affecting the displacements and internal forces generated in piles. This study has been completed in two phases: the first phase is a case study of the single Pile (reference case), where a study of the behavior of a single pile assigning structure is modeled with a degree of freedom. The parametric study results show that the presence of structure causes the application of a large load in the upper part of the pile resulting from the impact of inertia dominating the kinetic effect. The forces of inertia increases with the increasing mass of structure, and when the frequency of structure nears the frequency of seismic load. The second phase deals with the study of the situation of the group of piles, where the study handles the effect of a number of piles, piles spacing, and locations on the internal force and displacements generated in the piles. The parametric study results have shown for this phase of this research that an increase the number of piles in the group causes a significant increase of internal forces generated at the top of the pile and a slight decrease for those forces in the central part of the pile, that seismic loads are not distributed equally for all piles, and that corner piles are subject to greater loads while mid. Piles are subject to less load.

**Keywords:** Soil Structure Interaction, Piles, FEM-Earthquake Loads, Behavior- Seismic Loads

---

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

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

**مقدمة:**

تحظى دراسة التأثير المتبادل " تربة-وتد-منشأ " باهتمام كبير في تصميم الأوتاد تحت تأثير الحمولات الزلزالية (Bruce and Juran, 1997;Herbst, 1994;Benslimane et al., 1998, Wong (2004))، وتتطلب مثل هذه الدراسات حلاً لمسألة معقدة ثلاثية الأبعاد تحت تأثير حمولات ديناميكية مع وجود تباين كبير نسبياً في خواص المواد ناتج عن وجود الأوتاد ضمن التربة. ينتج هذا العمل المشترك عن تراكم أثرتين أساسيين: الأول حركي، ناتج عن فرق الصلابة بين الوتد والتربة، أما الأثر الثاني فناتج عن قوى العطالة التي تسببها كتلة المنشأ. تنتقل هذه القوى في الأوتاد مسببة فيها عزوم انعطاف وقوى قاصة كبيرة، وغالباً ما تكون هذه القوى السبب الأساس للأضرار الحاصلة في رؤوس الأوتاد نتيجةً لتأثير الزلازل (Mizuno, 1987;Kavvadas and Gazetas, 1993). مثال على ذلك الانهيار (التصدع) شبه التام لرؤوس عدد كبير من الأوتاد نتيجة زلزال Miyagiken- (Sugimura 1981, Mizuno 1987) Oki, 1978، وتصبح هذه الأضرار أكثر أهمية عندما يتوافق تردد الحمولة الزلزالية مع التردد الأساس للمنشأ (زلزال كاراكاس 1967) (Mizuno, 1987;Kavvadas and Gazetas, 1993). نشرت هيئة الطرق المركزية الأمريكية (FHWA) وجامعة البوليتكنيك في نيويورك العديد من الدراسات التجريبية والعديد المتعلقة بالتأثير المتبادل "تربة-وتد-منشأ" تحت تأثير الحمولات الزلزالية (Juran, et al. 1999;Benslimane1998;Benslimane, et al., 1998).

يمكن تلخيص نتائج هذه الدراسات كما يلي:

- تتبع الأوتاد حركة التربة بدون وجود الأوتاد (حركة الحقل الحر) باستثناء المنطقة الواقعة بالقرب من سطح الأرض.
- يزداد التردد الأساس للأوتاد بشكل كبير مع زيادة الكتلة الحجمية للوتد ومع زيادة صلابته.
- في حالة مجموعة الأوتاد ينخفض انتقال الأوتاد وعزوم الانعطاف وقوى القص المتولدة فيها مقارنة بحالة الوتد المنفرد.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف هذا البحث إلى دراسة سلوك الأوتاد تحت تأثير الحمولات الزلزالية من خلال نمذجة فراغية وباستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) -برنامج (ABAQUS) من خلال دراسة متغيرات لأهم المعاملات المؤثرة على الانتقالات و القوى الداخلية المتولدة في الأوتاد، و هي :

1. تأثير كتلة المنشأ وتردده الأساس على قوى العطالة المتولدة في الوتد وعلى الانتقالات في الوتد و المنشأ.
  2. تأثير عدد الأوتاد وتباعدها ومواقع الأوتاد على القوى الداخلية والانتقالات المتولدة في الأوتاد.
- و تأتي أهمية هذا البحث من خلال المساهمة في إغناء البحث العلمي والفهم الأفضل لسلوك الأوتاد تحت تأثير الحمولات الزلزالية و توضيح تأثير أهم العوامل المؤثرة على سلوك هذه الأوتاد و أخذها بعين الاعتبار في أثناء تصميم مثل هذا النوع من المنشآت في المناطق ذات الخطورة الزلزالية المرتفعة وذلك لتجنب أو للتقليل من الأضرار المتوقعة.

## طرائق البحث ومواده:

اعتمد في هذا البحث على المنهج التحليلي المقارن، حيث تم إجراء نمذجة رياضية و تحليل عددي ديناميكي ثلاثي الأبعاد بطريقة العناصر المنتهية (FEM) لسلوك الأوتاد المستخدمة كأساسات للمنشآت، وقد تم إنجاز البحث وفق مرحلتين أساسيتين:

- المرحلة الأولى: دراسة حالة وتد منفرد (حالة مرجعية): تتضمن دراسة سلوك وتد بيتوني منفرد يسند منشأ تم نمذجته باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) بجلمة ذات درجة حرية واحدة (عنصر مكون من عمود و كتلة متمركزة في أعلى العنصر). يتواجد الوتد في طبقة متجانسة من التربة تستند على سرير صخري قاسٍ تنتقل الموجة الزلزالية ضمنه إلى وسط التربة. و سيتم في هذه المرحلة إجراء دراسة بارامترية تتضمن تأثير كتلة المنشأ وتردده الأساس على قوى العطالة المتولدة في الوتد وعلى الانتقالات في الوتد و المنشأ.
- المرحلة الثانية: دراسة حالة مجموعة أوتاد: تتناول هذه المرحلة دراسة حالة مجموعة الأوتاد، حيث سيتم دراسة تأثير البارامترات الأساسية لمجموعة الأوتاد (عدد الأوتاد وتباعدها ومواقعها ضمن المجموعة) على القوى و الانتقالات المتولدة في الأوتاد.

## النتائج والمناقشة:

أ- دراسة حالة وتد بيتوني

يتكون المثال المرجعي من منشأ يستند على وتد احتكاك منفرد مغروز في طبقة متجانسة من التربة، مستندة على قاعدة صخرية. نفترض أن سلوك النموذج " تربة-وتد-منشأ " مرن مع وجود تخامد مادي. تمت نمذجة التخماد المادي بوساطة علاقات ريليه (Clough & Penzien, 1993)، حيث تكتب مصفوفة التخماد بالشكل:

$$[C] = a_m [M] + b_k [K]$$

حيث:

$[M]$  و  $[K]$  - تمثلان مصفوفة الكتلة ومصفوفة الصلابة على الترتيب

$a_m$  و  $b_k$  - عوامل تتعلق بتخماد المادة

الخواص الفيزيائية والميكانيكية للتربة والوتد والمنشأ مبينة على الشكل (1)، حيث أن طول الوتد ( $L_p=10$  m) ومقطعه مربع أبعاده ( $a=b=D_p=0.25$ m). سماكة طبقة التربة ( $H_d=15$ m)، ترددها الأساس ( $f_1=0.67$ Hz) ( $f_1 = \frac{V_s}{4H_d}$ )، سرعة الأمواج القاصة في التربة).

لقد تم نمذجة المنشأ بجلمة ذات درجة حرية واحدة، مكونة من عمود ارتفاعه  $h_{st}=1$ m ومن كتلة ( $m_{st}=10$  tons). تم حساب التردد الأساس للمنشأ من العلاقات التالية:

$$f_{st} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{st}}{m_{st}}}$$

$$K_{st} = \frac{3E_{st}I_{st}}{H_{st}^3}$$

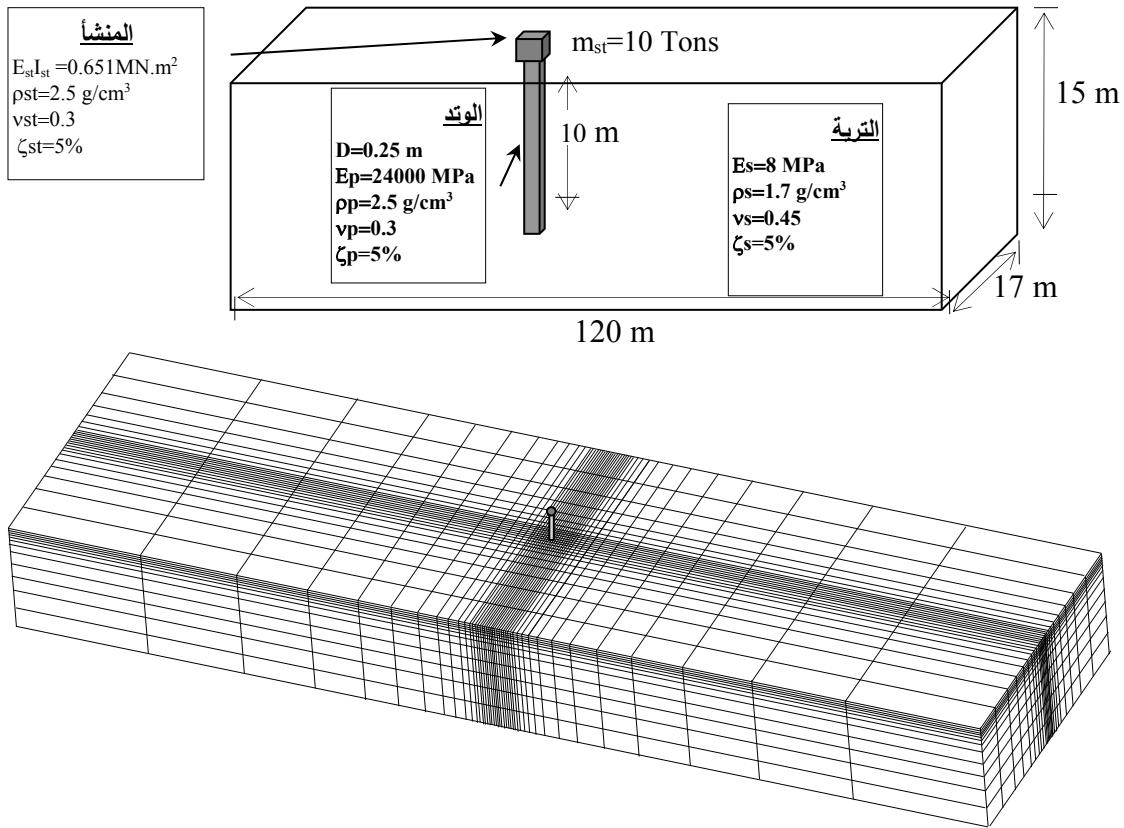
ينتج عن هذه العلاقات أن:  $K_{st}=23440 \text{ kN/m}$  و  $f_{st}=2.4 \text{ Hz}$ . يبين الشكل (1) شبكة العناصر المنتهية (FE-mesh) المستخدمة في التحليل العددي، وتتكون هذه الشبكة من 10417 عنصراً ثلاثي الأبعاد بـ 20 عقدة، أما الشروط الطرفية للنموذج المستخدم في هذه الدراسة فهي كالتالي:

← القاعدة صلبة (Rigid base)

← الحمولة الزلزالية مطبقة أسفل طبقة التربة (الحد السفلي للنموذج)، وهي عبارة عن تسارع توافقى

(هارموني) مطاله ( $a_g=0.2g$ ) وتردده  $f_{ch}$  مساوٍ لتردد الأساس لطبقة التربة ( $f_{ch}=f_1=0.67\text{Hz}$ ).

تم اختيار الأبعاد الخارجية للموديل بشكل مناسب بحيث تكون الحدود الطرفية الجانبية للموديل متوضعة على مسافة بعيدة عن محور الوزن ( $X_d=60\text{m}$ ) وذلك من أجل التخفيف من تأثير الشروط الطرفية الجانبية.

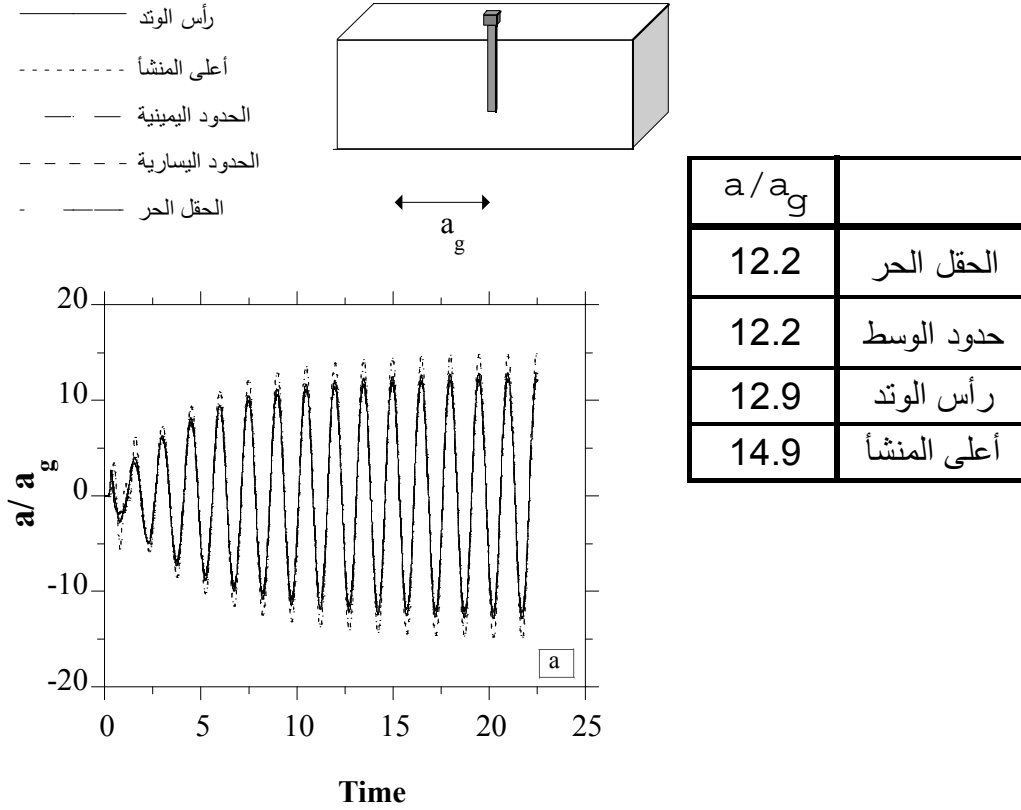


الشكل (1) مثال مرجعي: خواص وأبعاد و شبكة التقسيمات المستخدمة بطريقة العناصر المنتهية (FE-Mesh) الشكل (1) أبعاد و خواص النموذج الفراغي (3D-Model) لحالة وتد منفرد مع شبكة العناصر المنتهية

### ■ تأثير كتلة المنشأ وتردده الأساس

يبين الشكل (2) السجلات الزمنية للتسارع في رأس الوتد وفي أعلى المنشأ وفي نقطتين من التربة متوضعتين على أطراف الوسط. يمكن ملاحظة أن التسارعات على أطراف الوسط مطابقة لتلك الخاصة بالحقل الحر (دون وتد ولا منشأ)، وهذا يدل على أن مسافة الحدود الجانبية للوسط عن الوتد كافية كي نهمل تأثير الأمواج المنعكسة على الحدود الجانبية للوسط.

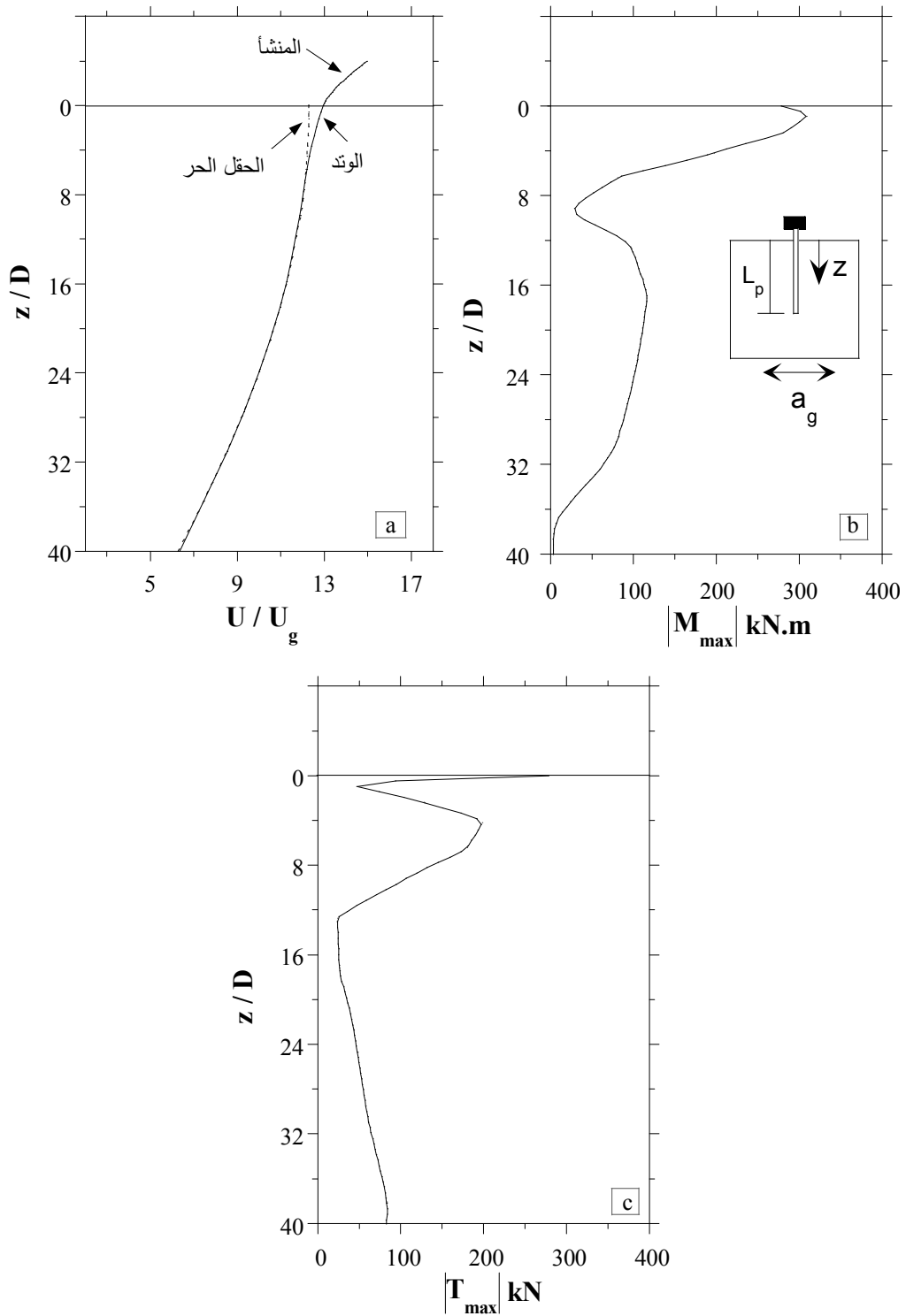
نلاحظ أيضاً أن تضخيم التسارع أعلى المنشأ ( $a_{st}/a_g=14.9$ ) وعند رأس الوتد ( $a_p/a_g=12.9$ ). أي أن تضخيم التسارع أعلى المنشأ أكبر من التضخيم عند رأس الوتد بحوالي 16%.



الشكل (2) السجل الزمني للتسارع

يبين الشكل (3a) الانتقالات الجانبية الأعظمية للوتد والمنشأ وللتربة في حالة الحقل الحر. نلاحظ بأن الوتد يتبع التربة في حالة الحقل الحر باستثناء المنطقة الواقعة بالقرب من رأس الوتد، حيث نلاحظ زيادة طفيفة لانتقال الوتد (بحدود 5%) عن انتقال التربة في حالة الحقل الحر. أما الانتقال الجانبي لأعلى المنشأ فهو أكبر بحوالي 16% من انتقال رأس الوتد.

كما نلاحظ من الشكلين (3b و 3c) الأثر الكبير لقوى العطالة (الناتجة عن وجود المنشأ) على عزوم الانعطاف والقوى القاصة المتولدة في الوتد، ويتمثل هذا الأثر في الزيادة الكبيرة في عزم الانعطاف وقوى القص بالقرب من رأس الوتد. يظهر على منحنى عزوم الانعطاف وجود ذروتين: الأولى عند رأس الوتد وهي ناجمة عن قوى العطالة نتيجة لوجود المنشأ. أما الذروة الثانية فتقع في الجزء الوسطي للوتد وهي ناتجة عن الأثر الحركي.



الشكل (3) نتائج الحالة المرجعية (حالة وتد منفرد): (3a) تضخيم الانتقالات، (3b) عزوم الانعطاف، (3c) قوى القص

### ■ تأثير خواص المنشأ

يتأثر سلوك الأوتاد تحت تأثير التحميل الزلزالي بخواص المنشأ (كتلة المنشأ  $m_{st}$  وتردده الأساس  $f_{st}$ ). يبين الشكل (4) تأثير كتلة المنشأ على سلوك الوتد تحت تأثير الحمولة الزلزالية المستخدمة في المثال المرجعي ( $a_g=0.2g$ ) ( $f_{ch}=f_1$ ). نلاحظ أن لكتلة المنشأ تأثيراً على كل من انتقال رأس الوتد وعزم الانعطاف والقوة القاصة. تؤدي زيادة كتلة المنشأ إلى زيادة طفيفة لانتقال رأس الوتد (حوالي 9%)، وإلى زيادة هامة لانتقال أعلى المنشأ (حوالي 35%)، وإلى زيادة كبيرة لعزم الانعطاف والقوى القاصة المتولدة في الوتد: تؤدي زيادة كتلة المنشأ (من 5 إلى 20 طن) إلى زيادة عزم الانعطاف الأعظمي  $M_{max}^*$  والقوة القاصة الأعظمية  $T_{max}^*$  قدرها حوالي 420%.

$$M_{max}^* = \frac{M_{max}}{\rho_p \cdot D_p^4 \cdot a_g}$$

$$T_{max}^* = \frac{T_{max}}{\rho_p \cdot D_p^3 \cdot a_g}$$

حيث:

$M_{max}$  و  $T_{max}$  - يمثلان عزم الانعطاف الأعظمي والقوة القاصة الأعظمية المتولدة في الوتد على الترتيب.  
 $M_{max}^*$  و  $T_{max}^*$  - يمثلان عزم الانعطاف الأعظمي اللابيدي و القوة القاصة الأعظمية اللابيدية على الترتيب (Kavvadas M. & Gazetas G., 1993, Kaynia & Mahzooni, 1996).

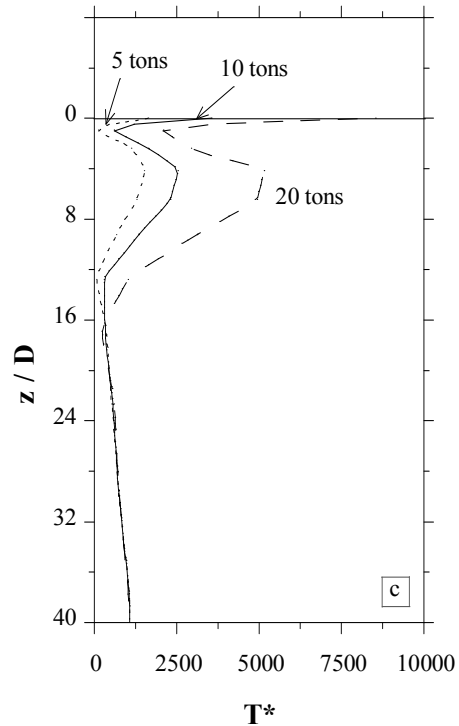
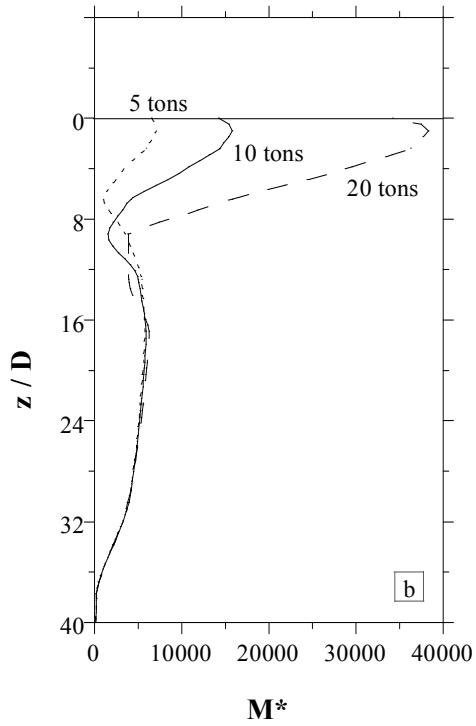
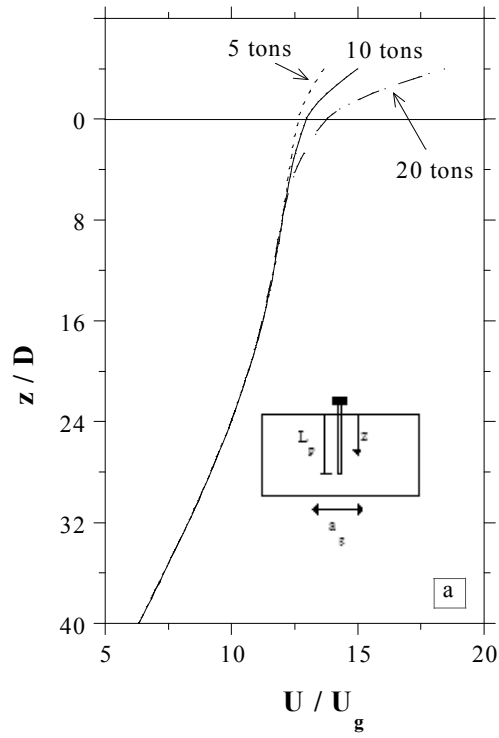
يبين الشكل (5) تأثير التردد الأساس للمنشأ ( $f_{st}$ ) على السلوك الزلزالي للوتد. نلاحظ التأثير الكبير لسلوك الوتد بالتردد الأساس للمنشأ، فعندما يزداد التردد الأساس للمنشأ من 0.5Hz إلى 0.67Hz نلاحظ زيادة كبيرة في انتقال أعلى المنشأ وفي عزم الانعطاف الأعظمي المتولد في الوتد (يزداد عزم الانعطاف الأعظمي اللابيدي حوالي 520%)، كما يزداد التضخيم في أعلى المنشأ حوالي 500%). كما أن زيادة التردد الأساس للمنشأ من 0.67Hz إلى 1Hz تسبب تناقصاً كبيراً لعزم الانعطاف الأعظمي في الوتد (يتناقص العزم اللابيدي حوالي 69%). تظهر هذه النتائج أهمية التردد الأساس للمنشأ في تصميم الأوتاد.

### ب- دراسة حالة مجموعة أوتاد:

سنتناول في هذه الحالة أثر مجموعة أوتاد، حيث سنقوم بعرض نتائج الدراسة لسلوك ثلاث مجموعات من أوتاد:

- المجموعة الأولى: قاعدة مستمرة تتضمن صف من ثلاثة أوتاد (X31)،
  - المجموعة الثانية: قاعدة مربعة الشكل تتضمن 9 أوتاد موزعة على ثلاثة صفوف (X3 3)،
  - المجموعة الثالثة: قاعدة مستطيلة الشكل تتضمن 15 وتداً موزعة على ثلاثة صفوف (X35).
- نعتبر في هذه الدراسة أن كتلة المنشأ مساوية عشرة أضعاف عدد الأوتاد محسوبة بالطن، أي:
- $$m_{st} = 10 * N_p \text{ tons}$$
- (حيث تمثل  $N_p$  عدد أوتاد المجموعة)، و التردد الأساس للمنشأ يساوي  $f_{st} = 1.41 \text{ Hz}$ .





الشكل (4) نتائج تأثير كتلة المنشأ: 4a) تضخيم الانتقالات، 4 b) عزوم الانعطاف الابعدي، 4c) قوى القص الابعدي

### ■ تأثير تباعد الأوتاد

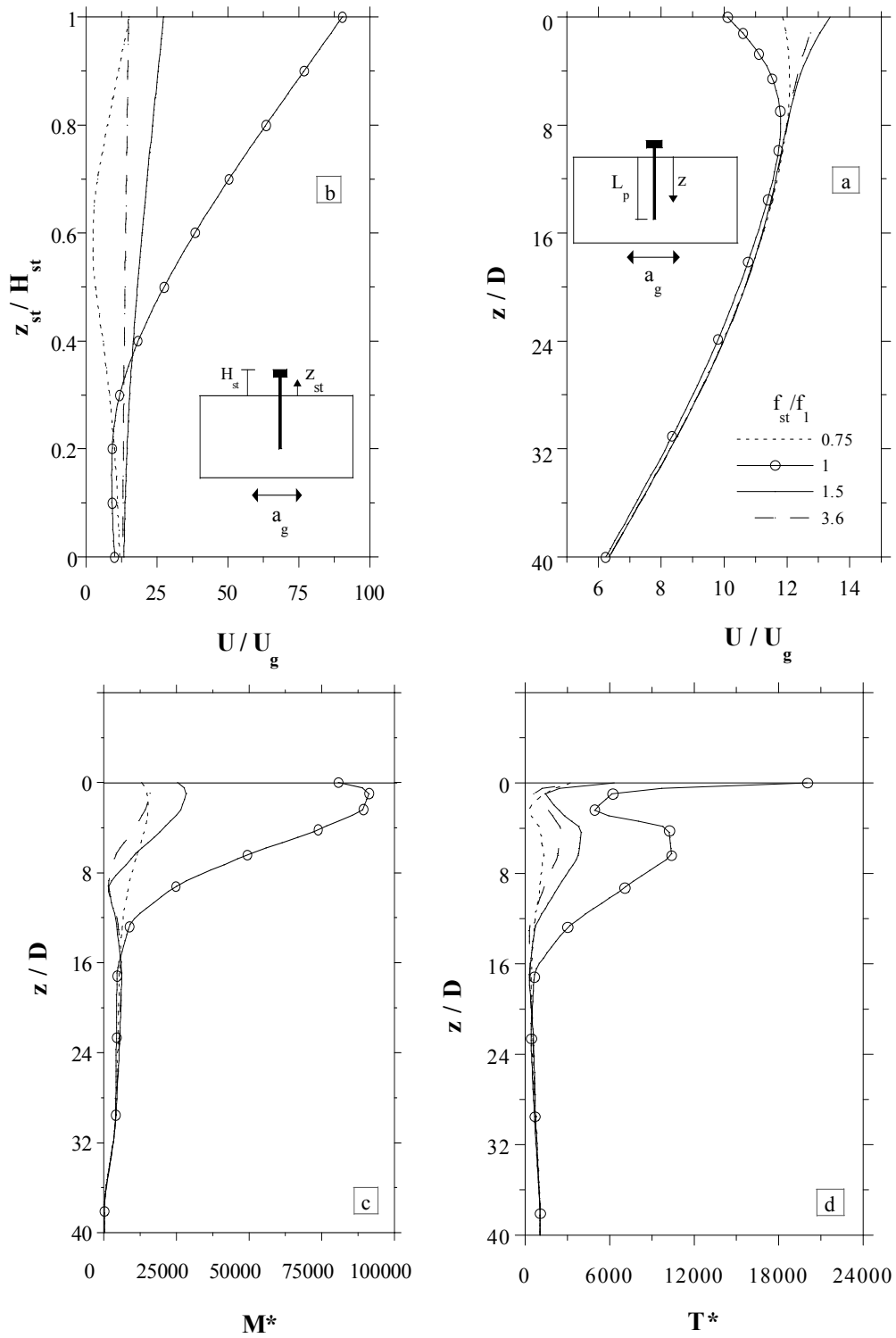
في حالة المجموعة الأولى من الأوتاد، لدينا منشأ يستند على صف من الأوتاد (X31) مغروزة في طبقة متجانسة من التربة مستندة على قاعدة صخرية، حيث تم افتراض أن أبعاد ومواصفات كل من وسطي التربة والأوتاد مماثلة للحالة المرجعية الخاصة بالوتد المنفرد.

يبين الشكل (6) النتائج التي تم الحصول عليها من أجل ثلاثة تباعدات لابعدية مختلفة لمجموعات الأوتاد المدروسة (7, 5, 3), حيث تمثل S تباعد الأوتاد. يظهر تحليل النتائج أن عزم الانعطاف الأعظمي في رأس الوتد (أثر العطالة) يزداد مع زيادة تباعد الأوتاد: تؤدي زيادة تباعد الأوتاد ممثلةً بالنسبة  $(S/D_p)$  من 3 إلى 7 إلى زيادة العزم الأعظمي  $M^*_{max}$  في الوتد الوسطي مقدارها حوالي 47%. هذه النتائج متوافقة مع النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من قبل (Juran et al. 1999). أما فيما يتعلق بتأثير تباعد الأوتاد على القوى القاصة المتولدة في الأوتاد فيظهر من الشكل (6b) أنه مهمل.

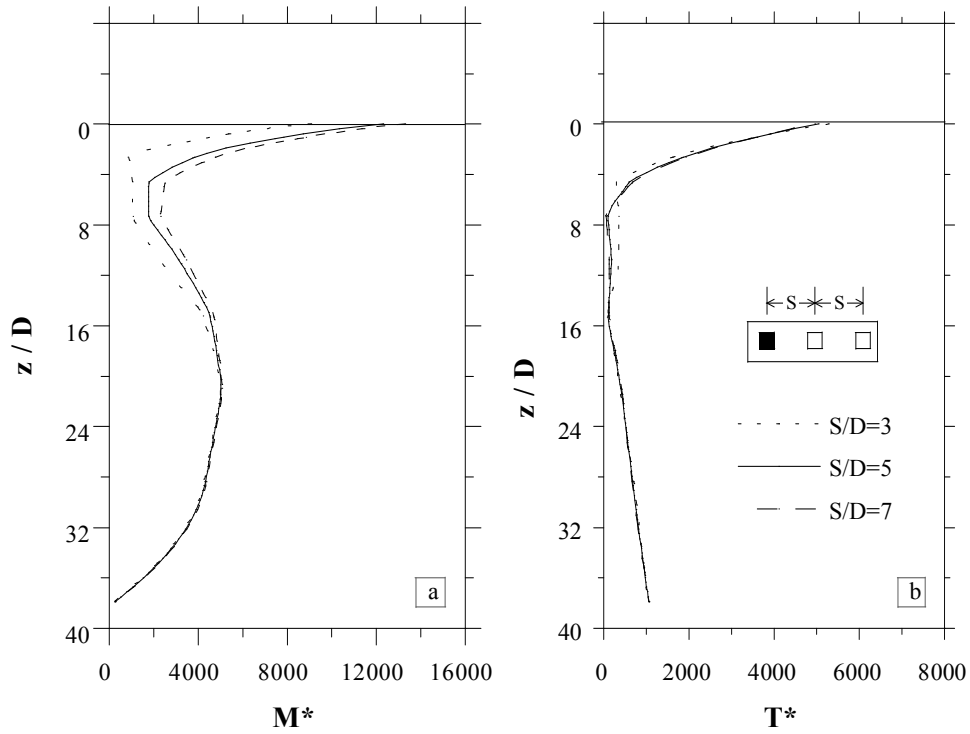
### ■ تأثير عدد الأوتاد ومواقعها ضمن المجموعة

لقد تم هنا دراسة ثلاث مجموعات من الأوتاد (X3, 3X31 و X53). يبين الشكل (7) النتائج التي تم الحصول عليها للأوتاد الركنية في المجموعات الثلاث. يمكن الملاحظة بأن زيادة عدد الأوتاد تسبب زيادة في عزوم الانعطاف والقوى القاصة في رؤوس الأوتاد. على سبيل المثال، عزم الانعطاف الأعظمي في العمود الركني للمجموعة X53 أكبر بحوالي 87% من عزم الانعطاف الأعظمي في العمود الركني للمجموعة X33. أما العزم الأعظمي في الجزء الوسطي من الوتد فيتناقص مع زيادة عدد الأوتاد (الشكل (7a)).

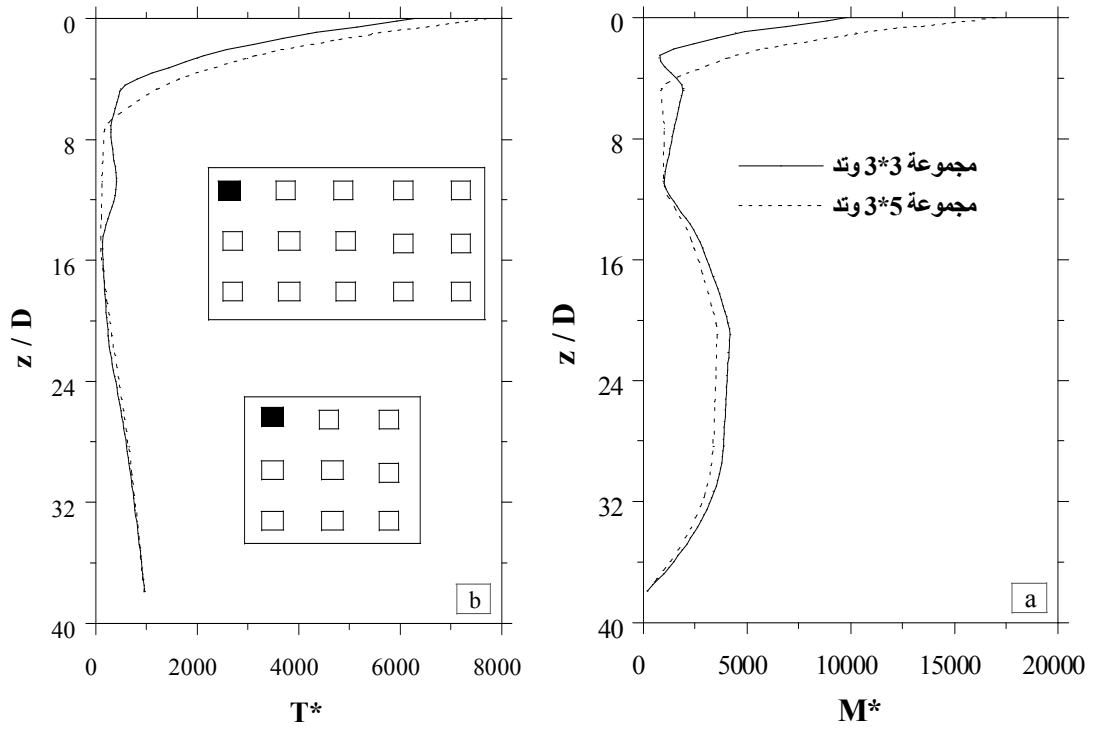
يبين الشكل (8) تأثير موقع الوتد على عزوم الانعطاف والقوى القاصة المتولدة في الأوتاد، حيث نلاحظ أن القوى الديناميكية لا تتوزع بشكل متساوٍ على جميع أوتاد المجموعة. في الحقيقة، الحمولات المطبقة على الأوتاد الركنية أكبر من الحمولات المطبقة على الوتد المركزي. يبلغ عزم الانعطاف الأعظمي في رأس الوتد المركزي (1) حوالي 40% من عزم الانعطاف الأعظمي في رأس الوتد الركني (3) (حوالي 42% للمجموعة X33 و حوالي 35% للمجموعة X53)، كما يبلغ عزم الانعطاف الأعظمي في رأس الوتد الجانبي (2) حوالي 83% من عزم الانعطاف الأعظمي في رأس الوتد الركني (حوالي 82% للمجموعة X33 و حوالي 84% للمجموعة X53).



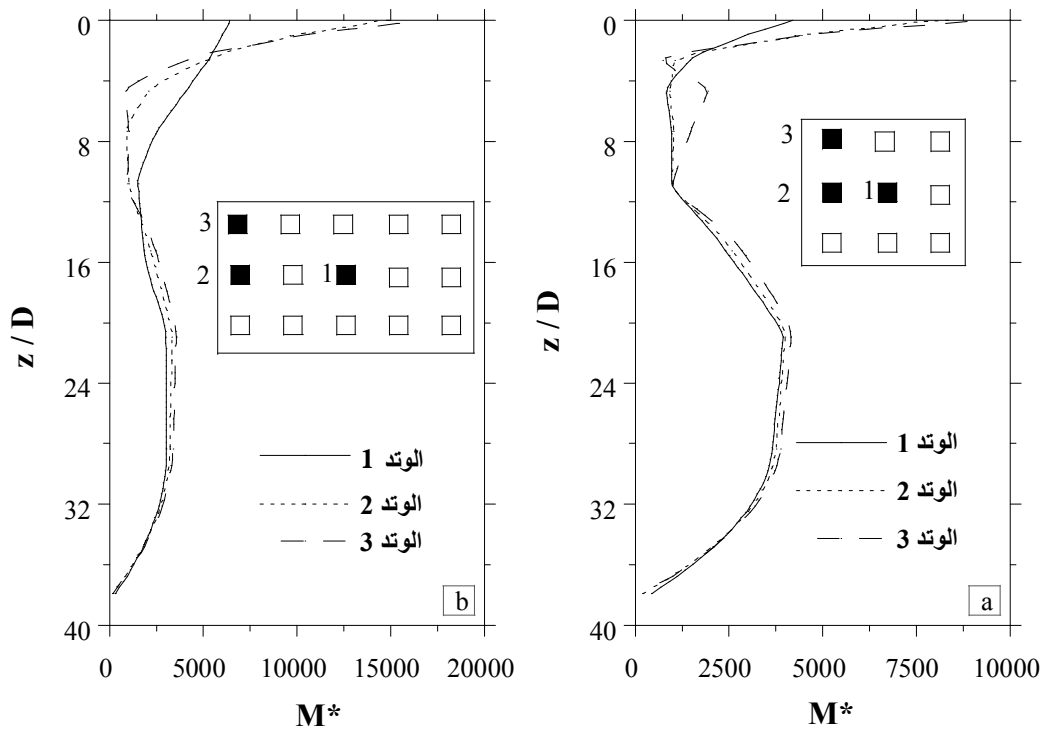
الشكل (5) نتائج تأثير التردد الأساس المنشأ: (5a) تضخيم الانتقالات في الوتد ، (5b) تضخيم الانتقالات في المنشأ، (5c) عزوم الانعطاف اللابعدى، (5d) قوى القص اللابعدية



الشكل (6) نتائج تأثير تباعد الأوتاد: (5a) عزوم الانعطاف اللابعدية، (5b) قوى القص اللابعدية



الشكل (7) نتائج تأثير عدد الأوتاد: (5a) عزوم الانعطاف اللابعدية، (5b) قوى القص اللابعدية



الشكل (8) نتائج تأثير موقع الوتد على عزم الانعطاف اللابدي

### الاستنتاجات والتوصيات:

- تناول هذا البحث دراسة تحليلية عددية بطريقة العناصر المنتهية لنموذج ثلاثي الأبعاد بهدف دراسة السلوك الزلزالي للأوتاد المستخدمة كأساسات للمنشآت، و يمكن تلخيص أهم النتائج التي أظهرتها الدراسة فيما يلي:
1. إن انتقال الأوتاد قريب من انتقال التربة في حالة الحقل الحر (تربة بدون وتد تحت تأثير الزلازل)، وهذه النتيجة متوافقة مع نتائج الدراسة التجريبية التي تم الحصول عليها من قبل (Juran et al. 1999).
  2. يسبب وجود المنشأ تطبيق حمولة كبيرة في الجزء العلوي من الوتد ناتجة عن أثر العطالة ويكون طاغياً على الأثر الحركي.
  3. تتعلق قوى العطالة بشكل أساسي بكتلة المنشأ وتردده الأساس، حيث تزداد قوى العطالة بزيادة كتلة المنشأ، كما تزداد بشكل كبير عندما يكون التردد الأساس للمنشأ قريب من تردد الحمولة الزلزالية.
  4. في حالة مجموعة الأوتاد، لوحظ أن زيادة عدد الأوتاد في المجموعة تسبب زيادة كبيرة للقوى الداخلية المتولدة في رأس الوتد وتناقصاً طفيفاً لهذه القوى في الجزء الوسطي من الوتد.
  5. لوحظ عدم توزع الحمولات الزلزالية بشكل متساوٍ على جميع الأوتاد فالأوتاد الركنية تخضع لأكثر حمولة بينما أن الوتد (أو الأوتاد الوسطية) تخضع لأقل حمولة.

## المراجع:

- 1) Benslimane, A. "Seismic Behavior of Miropile Systems – Centrifuge Model Studies", Ph.D. dissertation, Polytechnic University, New York (1998).
- 2) Benslimane, A., Juran , I., Hanna, and S., Drabkin "Seismic Behavior of Micropile Systems", *ASCE- Geotechnical Special Publication* No. 81 – Boston (1998).
- 3) Benslimane, A., Juran , I., Hanna, S., Drabkin, S., Perlo, S., Frank, R. " Seismic Retrofitting Using Micropile Systems: Centrifugal Model Studies", Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St Louis, Missouri March (1998), pp. 8-15.
- 4) Bruce, D. A., and I. Juran "Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review". U.S. Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-96-017, (1997).
- 5) Clough R.W. &Penzien J. "Dynamics of structures", Mac Graw Hill, (1993).
- 6) Herbst, T. F. "The GEWI-PILE, A Micropile for Retrofitting, Seismic Upgrading and Difficult Installation", Proceedings of International Conference on Design and Construction of Deep Foundations Sponsored by the U.S Federal Highway Administration (FHWA), Volume 2, (1994), pp. 913-930.
- 7) Juran I. &Benslimane A. & Hanna S. "Engineering analysis of the dynamic behavior of micropile systems", Transportation Research Board, (1999).
- 8) Juran I. &Benslimane A. & Hanna S "Seismic behavior of micropile systems-Centrifuge test results", Preliminary report- FHWA Contract No DTFH61-96-00021, (1999).
- 9) Kavvadas M. &Gazetas G. "Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil", *Géotechnique* 43, No. 2, (1993), pp. 207-222.
- 10) Kaynia A. &Mahzooni S. "Forces in pile foundation under seismic loading", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 122, N0. 1, (1996), pp. 46-53.
- 11) Mizuno, H. "Pile damage during earthquakes in Japan", *Dynamic response of Pile Foundations*(ed. T. Nogami), New York : American Society of Civil Engineers, (1987), pp. 53-78.
- 12) Wong, J. C. "The Seismic Behavior of Micropiles" ,Master Thesis. Washington State University. WA. USA, (2004).