

دراسة عددية لانتشار الاهتزازات الناتجة عن الرّصّ الديناميكي للتربة بطريقة الوزن الساقط

الدكتور رامي العبدہ *
الدكتور صفوان عبد الله **
دارين أحمد ***

(تاريخ الإيداع 3 / 11 / 2010. قُبِلَ للنشر في 6 / 4 / 2011)

□ ملخص □

يتضمن هذا البحث دراسة عددية بطريقة العناصر المنتهية للاهتزازات الناتجة عن الرّصّ الديناميكي للتربة بطريقة الوزن الساقط. من أجل ذلك، قمنا بوضع موديل عددي مناسب للمسألة يعتمد على نمذجة كل من قوة الرّصّ ووسط الانتشار (التربة) وإدخاله في برنامج الحساب ABAQUS. قمنا بتحقيق الموديل العددي على نتائج قياسات حقلية حصلنا عليها بنتيجة البحث المرجعي ووجدنا تقارباً جيداً بين القياسات والنتائج العددية. بعد ذلك قمنا بتطبيق الموديل على مثال نموذجي بهدف دراسة انتشار وتخامد الاهتزازات الناتجة عن الرّصّ الديناميكي وتوصلنا إلى تحديد نوع الأمواج المسيطرة وعلاقة تخامدها. أخيراً أجرينا دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة في مطال الاهتزازات الناتجة عن الرّصّ (كتلة الوزن الساقط، ارتفاع السقوط، معامل المرونة، نسبة التخامد،...إلخ). تسمح نتائج البحث بالتنبؤ بمطال الاهتزاز على مسافة ما من نقطة الرص قبل البدء عملياً بالرّصّ ومن ثمّ تقدير الآثار المحتملة على الناس والمنشآت المجاورة واتخاذ التدابير اللازمة عند الضرورة لتفاديها.

الكلمات المفتاحية: الرّصّ الديناميكي، اهتزازات التربة، تخامد الاهتزازات، طريقة العناصر المنتهية، ABAQUS.

*مدرس - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** مدرس - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

A Numerical Study of Propagation of Ground Vibrations Caused by Dynamic Compaction by Falling Weight.

Dr. Rami Alabdeh*
Dr. Safwan Abdullah**
Darine Ahmad***

(Received 3 / 11 / 2010. Accepted 6 / 4 / 2011)

□ ABSTRACT □

This research contains a numerical study using FEM of propagation of ground vibrations induced by dynamic compaction by falling weight. So, we proposed a suitable numerical model which depends on the simulation of both compaction force and propagation site by using ABAQUS. The calculated results are compared with in-situ measurements obtained from the study of references and a good agreement is showed. The model is tested on a typical example for studying the propagation and damping of vibrations which enabled us to determine dominant waves and attenuation relation. Finally, a parametric study for the affected factors (falling weight and height, elastic modulus, damping ratio, etc.) is achieved. The obtained results allow evaluating the amplitude of vibrations at some distance to estimate the probable effects on people and adjacent structures to be avoided.

Key words: Dynamic compaction, ground waves, damping of vibrations, finite element method, ABAQUS.

* 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.

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

مقدمة:

يعتبر الرّصّ الديناميكي بطريقة الوزن الساقط (Dynamic Compaction by Falling Weight) من الطرق الشائعة والفعالة التي تستخدم لتحسين أنواع مختلفة من الترب (الترب الحبيبية السائبة، الردميات، الترب ذات المسامية العالية، الترب القابلة للتسيل، الترب الانخفاسية، الترب العضارية الجافة والمشبعة جزئياً،... إلخ) حيث يزيد الرّصّ عموماً من ارتصاص التربة وقدرة تحملها ويقلل من هبوطها وقابليتها للتسيل [1] [2].

يعتمد مبدأ الرّصّ الديناميكي بالوزن الساقط على تكرار عملية رفع وزن ثقيل (5-40 t) بواسطة كبل مفرد إلى ارتفاع عالٍ (10-40m) وإسقاطه على سطح الأرض في نقاط موزعة على المساحة المراد رصها ببتباعد (4-9m). يدعى كل سقوط للوزن "دقة". من أجل الوصول إلى درجة الرّصّ المطلوبة قد يكفي تنفيذ شوط رص واحد (عدد معين من الدقات المتتالية في كل نقطة) وقد يلزم أحياناً أكثر من شوط. يتم بعد كل شوط تسوية الحفر المتشكلة في نقاط سقوط الوزن أو ملؤها بمادة ردم حبيبية قبل تنفيذ شوط الرص التالي.



الشكل (1) الرّصّ الديناميكي باستخدام وزن ساقط على شكل بلاطة مربعة.

رغم المزايا العديدة لهذه الطريقة فإن إحدى النواحي السلبية التي لا يجب إغفالها هي توليدها لاهتزازات تنتشر في التربة المحيطة بمنطقة الرّصّ على شكل أمواج اهتزازية (Ground Waves) يمكن أن تسبب أضراراً في المنشآت المجاورة وإزعاجاً للناس في الجوار في حال كان موقع الرص قريباً من المباني والمنشآت. لذلك فإن استخدامها يجب أن يتم بحذر في حالة توضع الورشة في منطقة عمرانية حيث يكون من الضروري قبل إجراء الرص التنبؤ بمطال الاهتزازات (Vibration Amplitude) الناتجة عنه في كل نقطة من التربة لتقييم التأثيرات المحتملة على الناس والمنشآت المجاورة واتخاذ التدابير اللازمة عند الضرورة قبل البدء بعملية الرص فعلياً.

تقسم الأمواج الاهتزازية بشكل عام إلى قسمين أساسيين هما الأمواج الحجمية (Body Waves) والأمواج السطحية (Surface Waves). تنتشر الأمواج الحجمية ضمن كتلة التربة وتقسّم إلى نوعين أساسيين: أمواج رئيسية أو أمواج ضغط (Primary or Compression Waves) P تترافق مع تغير في الحجم (حيث تسبب بالتناوب شد وضغط للتربة) وتؤدي أثناء مرورها إلى اهتزاز جزيئات التربة في الاتجاه الموازي لمسار انتشار الموجة (الشكل 2.a) وأمواج ثانوية أو أمواج قص (Secondary or Shear Waves) S تترافق مع اهتزاز جزيئات التربة في الاتجاه العمودي على مسار انتشار الموجة دون حدوث تغيير في الحجم (الشكل 2.b). تعطى سرعة انتشار موجة الضغط (Compressional Wave Velocity) C_p وسرعة انتشار موجة القص (Shear Wave Velocity) C_s في تربة متجانسة مرنة كما يلي [14]:

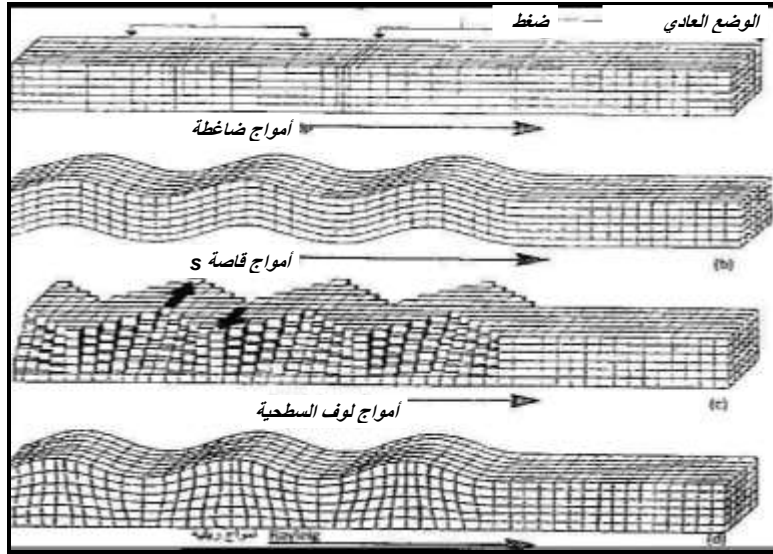
$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (2)$$

حيث: E: معامل مرونة التربة (معامل يونغ) (kPa)

μ : معامل بواسون للتربة

ρ : الكتلة الحجمية للتربة (t/m^3)



الشكل (2) أنواع الأمواج الاهتزازية.

أما الأمواج السطحية فتنتشر على عمق محدود بالقرب من سطح الأرض (حتى عمق مساو تقريباً لطول الموجة) ويمكن تشبيه انتشارها بانتشار الأمواج على سطح بحيرة راكدة عند إلقاء حجر فيها. يمكن تمييز نوعين رئيسيين من الأمواج السطحية هما: أمواج لوف (Love Waves) L التي تؤدي إلى تحرك نقاط التربة في المستوي المماس لسطح التربة عمودياً على اتجاه انتشارها (الشكل 2.c) ولا تؤدي إلى حدوث تشوهات قاصة وأمواج ريلية (Rayleigh Waves) R وهي النوع الأكثر انتشاراً من الأمواج السطحية وتترافق بحركة أفقية وشاقولية (حركة إهليلجية) لجزيئات التربة شبيهة بحركة زبد البحر على الموجة الحاملة (الشكل 2.d) وتؤدي إلى تشوهات ضاغطة (شادة) فضلاً عن تشوهات القص. تنتشر الأمواج R بسرعة أصغر بقليل من C_s حسب العلاقة:

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} C_s \cong (0.87 - 0.96)C_s \quad (3)$$

تفقد الأمواج الناتجة من طاقتها أثناء انتشارها ومن ثم يقل مطالها (Amplitude) مع ازدياد المسافة عن نقطة الرص، تدعى هذه الظاهرة بتخامد الاهتزازات (Vibration Damping) الذي يقسم بشكل عام إلى نوعين أساسيين: تخامد مادي (Material Damping) وتخامد هندسي أو تخامد بالإشعاع (Geometrical Damping). يعود التخامد الهندسي المستقل عن خواص التربة إلى ازدياد جبهة الموجة أثناء انتشارها ومن ثم انتشار الطاقة على حجم أكبر. يعبر عموماً عن التخامد الهندسي بواسطة العلاقة التالية [3]:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n \quad (4)$$

حيث V_1 و V_2 تعبران عن مطال الاهتزازات على مسافة r_1 و r_2 من المنبع على التوالي و n هو معامل التخامد الهندسي. تتعلق قيمة المعامل n بكل من نوع الموجة المنتشرة، موضع المنبع الاهتزازي والمسافة بين منبع الاهتزاز ونقطة قياس الاهتزاز. يبين الجدول (1) القيم النظرية المقترحة للمعامل n [4]:

الجدول (1): قيم معامل التخامد الهندسي n [4]

قيمة المعامل n	موضع نقطة القياس	نوع الموجة الاهتزازية	موضع مصدر الاهتزاز
0.5	سطحية	موجة سطحية R	نقطة على السطح
2	سطحية	موجة حجمية	نقطة على السطح
1	سطحية	موجة حجمية	نقطة عميقة
1	عميقة	موجة حجمية	نقطة عميقة

أما التخامد المادي فهو يتعلق بخواص التربة وينتج عن لزوجة التربة والاحتكاك الداخلي بين جزيئاتها ويعبر عنه بوساطة العامل α (m^{-1}) الذي يدعى "عامل التخامد المادي" والذي تتعلق قيمته بنوع التربة. يبين الجدول (2) قيمة نظرية مقترحة للمعامل α حسب حالة التربة [5]:

الجدول (2): تصنيف الترب حسب عامل التخامد المادي α [5]

حالة التربة	عامل التخامد المادي α (1/m)		الفئة (Class)
	50 Hz	5 Hz	
ترب ضعيفة أو رخوة (Weak or soft soils) ($N_{SPT} < 5$)	0,1 - 0,3	0,01 - 0,03	I
ترب جيدة التحمل (Competent soils) ($5 < N_{SPT} < 15$)	0,03 - 0,1	0,003 - 0,01	II
ترب صلبة (Hard soils) ($15 < N_{SPT} < 50$)	0,003 - 0,03	0,0003 - 0,003	III
صخر صلب جيد التحمل (Hard, competent rock) ($50 < N_{SPT}$)	<0,003	< 0,0003	IV

تم ربط التخامد المادي بالتخامد الهندسي والتعبير عنهما معاً بالعلاقة التالية:

$$W_r = W_0 \cdot e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (5)$$

حيث: W_r : طاقة موجة الاهتزاز في نقطة القياس المتوسطة على مسافة r من منبع الاهتزازات.

W_0 : طاقة موجة الاهتزاز في نقطة المنبع.

r : بعد نقطة القياس عن نقطة مرجعية.

r_0 : بعد منبع الاهتزازات عن النقطة المرجعية.

إن معرفة مطال الاهتزازات على مسافة معينة من المصدر أو المنبع الاهتزازي يعد ضرورياً لتوقع آثارها المحتملة على التربة والناس والمنشآت المجاورة. من أجل ذلك يجب قبل التطبيق الفعلي للحمولة الديناميكية إيجاد أو وضع علاقة تخامد (مطال الاهتزاز - المسافة عن المصدر) تأخذ بالحسبان كلاً من نوع المصدر الديناميكي للاهتزاز المزمع تطبيقه و مواصفات وشروط تربة الموقع. يتم إيجاد مثل هذه العلاقة بطرق متعددة أهمها:

- الطريقة التجريبية الحقلية: تشكل أفضل الطرق وأضمنها حيث يتم فيها وضع علاقة التخامد الحقيقية تجريبياً في الموقع. تعتمد هذه الطريقة على استخدام محرض اهتزازات يرسل اهتزازات ماثلة للمصدر الحقيقي و قياس مطال الاهتزازات في ثلاث أو أربع نقاط تقع على استقامة واحدة على سطح الأرض ومن ثم رسم منحنى التخامد الفعلي المار بهذه النقاط و الذي يمكن استخدامه لتوقع مطال الاهتزاز عند أي نقطة أخرى وسيطة. رغم الدقة الكبيرة لهذه الطريقة غير أنها قد تكون غير ممكنة التطبيق عملياً في بعض الحالات مثل حالة وجود المنبع الاهتزازي في موقع سكني مأهول لا تتوفر فيه المساحات الخالية اللازمة لوضع نقاط القياس الأولية.

- الطريقة التجريبية النظرية: يتم في هذه الطريقة توقع مطال الاهتزازات عن طريق علاقات تخامد تجريبية تم وضعها انطلاقاً من قياسات حقلية تم إجراؤها مسبقاً في حالات مشابهة للحالة المراد دراستها أو علاقات تخامد نظرية تم اشتقاقها من المعادلة العامة لانتشار الأمواج (General Wave Equation). يمكن أن نذكر كمثل على العلاقات التجريبية العلاقة التالية [13]:

$$PPV = \left(\frac{153}{r}\right)^{1.7} \quad (6)$$

حيث: PPV: السرعة الجزئية العظمى للاهتزاز (القيمة الحدية المسموحة) (mm/sec)
r: البعد عن نقطة الصدم (الرّصّ) (m).

يجب الانتباه إلى خصوصية مثل هذه العلاقة عند استخدامها لتوقع الاهتزازات حيث يمكن أن تعطي نتائج خاطئة عند استخدامها من أجل موقع مختلف عن الموقع الأصلي الذي وضعت من أجله العلاقة. أما بالنسبة لعلاقات التخامد النظرية فأكثرها انتشاراً واستخداماً هي علاقة بورنيتز (Bornitz) المسماة باسم العالم الذي وضعها عام 1931م و التي تكتب بالشكل [3]:

$$V_b = V_a \left(\frac{r_a}{r_b}\right)^n e^{\alpha(r_a - r_b)} \quad (7)$$

حيث: V_b و V_a : مطال الاهتزازات على مسافة r_a و r_b من المصدر ($r_b > r_a$)

n : معامل التخامد الهندسي

α : معامل التخامد المادي

يجب الانتباه إلى أن هذه المعادلة تمثل حلاً لمعادلة الموجة من أجل موجة أحادية الطور ذات تردد ثابت وتنتشر في تربة متجانسة وهذا ما يحد عملياً من دقة استخدامها نظراً لوجود أمواج متعددة ذات ترددات مختلفة، ومع ذلك تبقى هي العلاقة الأكثر انتشاراً كونها تأخذ بالحسبان كلا التخامدين المادي والهندسي في التربة من جهة، وتعطي نتائج مقاربة للواقع شرط تحديد نوع الموجة المسيطرة من بين الأمواج المختلفة المنتشرة في التربة من جهة أخرى.

- الطريقة العددية: وهي أكثر الطرق فعالية حيث تعتمد على استخدام الطرق العددية كطريقة الفروقات المنتهية (Finite Difference Method) وطريقة العناصر المنتهية (Finite Element Method) التي تسمح بدراسة

مفصلة وتحليل عميق لظاهرة انتشار الأمواج ليس على سطح التربة فقط وإنما في داخلها أيضاً، كما تسمح بإجراء دراسة بارامترية للعوامل المؤثرة في مطال الاهتزازات المنتشرة في التربة

أهمية البحث وأهدافه:

تزايد الاهتمام في السنوات الأخيرة بالزّصّ الديناميكي بالوزن الساقط كطريقة عملية فعالة لرّصّ الرديميات والترّب المفككة بشكل خاص. لكن أغلب الدراسات الموجودة حول عملية الرّصّ والأمواج الاهتزازية الناتجة عنها قد ركزت بشكل أساسي على دراسة فعالية الرّصّ وتحديد المنطقة المتأثرة بالرّصّ تحت وفي جوار الوزن الساقط في حين أهملت أو تطرقت لمسألة انتشار الاهتزازات في التربة بعيداً عن نقطة الرّصّ بشكل سريع ([2],[6],[7],[8]).

لذلك فإن أهمية هذا البحث تتبع من ندرة الدراسات المفصلة للاهتزازات الناتجة عن الرّصّ الديناميكي للتربة، رغم أهمية الموضوع، حيث تم وضع واختبار موديل عددي بسيط نسبياً وفعال في أن معاً يمكن استخدامه قبل تنفيذ الرص للتنبؤ بأنواع أمواج الاهتزازات المختلفة التي ستنج وتتبع انتشارها في التربة ومن ثم توقع مطال الاهتزازات في كل نقطة من التربة واتخاذ التدابير اللازمة عند الضرورة للحد من تأثيرها المحتمل على الناس والمنشآت المجاورة. إضافة إلى ذلك، فقد توصلنا بنتيجة الدراسة البارامترية التي أجريناها إلى تحديد أهم العوامل المؤثرة في مطال الاهتزازات الناتجة عن الرّصّ الديناميكي بالوزن الساقط وشكل هذا التأثير مما يساهم في تحسين عملية الرص ويمكن من التحكم بمستوى الاهتزازات الناتجة عنها.

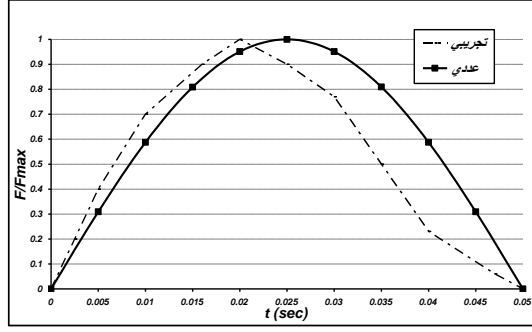
طرائق البحث ومواده:

اعتمدنا في دراستنا على استخدام طريقة العناصر المنتهية لنمذجة مسألة انتشار الاهتزازات الناتجة عن الرص الديناميكي للتربة بالوزن الساقط. قمنا أولاً بوضع موديل عددي مناسب للمسألة يعتمد على نمذجة كل من قوة الرص والتربة وإدخاله في برنامج الحساب بطريقة العناصر المنتهية ABAQUS ومن ثم تحقيقه على نتائج قياسات حقلية حصلنا عليها بنتيجة البحث المرجعي. بعد التحقيق استخدمنا الموديل لإجراء دراسة عددية في المجال الزمني للاهتزازات الناتجة توصلنا بنتيجتها إلى نتائج هامة تتعلق بنوع الأمواج الاهتزازية الناتجة عن الرص وكيفية تخامدها وأهم العوامل المؤثرة في مطالها.

الموديل العددي

1- نمذجة قوة الرص

إن نمذجة الرّصّ الديناميكي للتربة بطريقة العناصر المنتهية تستلزم معرفة قوة الرّصّ المطبقة على سطح التربة. وجد نتيجة قياسات حقلية متعددة أن الحمولة الديناميكية الناتجة عن سقوط الوزن على سطح التربة المراد رصها يمكن تمثيلها بتابع (قوة-زمن) بشكل نصف موجة جيبيية متخامدة (Damped Half Sine Wave) تؤثر خلال زمن قصير جداً (حوالي 0.05sec) [2] كما هو موضح في الشكل (3):



الشكل (3) مخطط نمذجي (قوة-زمن) للحمولة الناتجة عن الرص الديناميكي للتربة بطريقة الوزن الساقط.

أما مطال قوة الرص الديناميكية (F_{max}) فيمكن تقديره باستخدام العلاقة التالية [8]:

$$F_{max} = \sqrt{\frac{32MgHG r_0}{\pi^2(1-\mu)}} \quad (8)$$

حيث: M : كتلة الوزن الساقط (kg).

g : تسارع الجاذبية الأرضية (m/sec^2).

H : ارتفاع السقوط (m).

G : معامل القص للتربة (Pa).

r_0 : نصف قطر الوزن الساقط (m).

μ : معامل بواسون.

اعتماداً على ما تقدم، قمنا في دراستنا بتمثيل قوة الرص الديناميكي بمخطط (قوة-زمن) بشكل نصف موجة جيبية تؤثر خلال زمن قصير يساوي 0.05sec ومطالها F_{max} محسوب من العلاقة (8) كما هو موضح في الشكل (3). قمنا بإدخال هذه القوة في برنامج الحساب كحمولة ضغط موزعة بانتظام على سطح التربة على مساحة دائرية نصف قطرها مماثل لنصف قطر الوزن الساقط .

2- التقسيم بطريقة العناصر المنتهية

إن التقسيم بطريقة العناصر المنتهية للعلاقات التي تحل مسألة التأثير المتبادل بين التربة والوزن الساقط يقود

إلى جملة المعادلات التالية:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (9)$$

حيث: $[M]$: مصفوفة الكتلة، $[C]$: مصفوفة التخماد، $[K]$: مصفوفة الصلابة، $\{F\}$: شعاع القوى الخارجية المؤثرة في عقد شبكة العناصر المنتهية، $\{u\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{\ddot{u}\}$: أشعة الانتقال والسرعة والتسارع الجزيئية في عقد الشبكة، قمنا بأخذ تخامد التربة بالحسبان باستخدام صيغة التخماد اللزج لريليه (Rayleigh Viscous Damping) والتي يتم فيها تشكيل مصفوفة التخماد $[C]$ بشكل مركب من كل مصفوفة الصلابة $[K]$ ومصفوفة الكتلة $[M]$ وفق الصيغة التالية [9]:

$$[C] = \alpha_M [M] + \alpha_K [K] \quad (10)$$

حيث: a_M, a_K هي عوامل تعتمد على خواص تخامد المادة.

يقود تركيب مصفوفة التخماد بهذا الشكل إلى تمثيل التخماد باستخدام نسبة التخماد ξ (Damping Ratio) والتي هي مجموع حدين، الأول يتناسب طردياً مع التردد الزاوي (Angular Frequency) للاهتزاز ω والثاني يتناسب عكساً معه حسب العلاقة:

$$\xi_i = \frac{\alpha_M}{2\omega_i} + \frac{\alpha_K \omega_i}{2} \quad (11)$$

حيث: ξ_i : نسبة التخماد لنمط

الاهتزاز رقم i وهي تختلف حسب طبيعة التربة وتطبقاتها والوسط المحيط، وتتراوح عادة بين (5-10%) في مسائل انتشار الأمواج المرنة (Elastic Waves) في التربة.

3- التقسيم الفراغي والزمني:

3-1- معيار التقسيم الفراغي (اختيار Δx)

إن اختيار أبعاد العناصر المنتهية Δx مهم جداً لضمان التمثيل الصحيح لانتشار الأمواج الاهتزازية في التربة. عموماً، ينصح باستخدام شبكة من العناصر المنتهية بحيث لا يتعدى بعدها الأعظمي النسبة $(\lambda_{min}/10)$ [2] حيث λ_{min} هي طول الموجة الأصغر (توافق الموجة الأطول وهي الموجة السطحية R). لذلك قمنا باختيار بعد شبكة العناصر المنتهية Δx وفقاً للعلاقة التالية:

$$\Delta x \leq \frac{\lambda_R}{10} : \lambda_R = \frac{C_R}{f} \quad (12)$$

حيث: C_R هي سرعة انتشار أمواج ريليه السطحية و f هو تردد الاهتزازات.

3-2- معيار التقسيم الزمني (اختيار Δt)

يجب اختيار الخطوة الزمنية للحساب Δt بعناية من أجل ضمان دقة الحل. أعطى [2] العلاقة العملية التالية لاختيار Δt :

$$\frac{1}{10} \frac{\Delta x}{C_p} \leq \Delta t \leq \frac{\Delta x}{C_p} \quad (13)$$

حيث Δx يمثل البعد الأصغر لعناصر الشبكة و C_p يمثل سرعة انتشار الموجة الأسرع (موجة الضغط P).

3-3- الشروط المستخدمة

باعتبار أن الأمواج الاهتزازية الناتجة عن الرص الديناميكي للتربة توصف بالأمواج المرنة (Elastic Waves) لأن تحليلها في المراجع المختلفة يتم بالاعتماد على معادلة انتشار الأمواج في وسط مرن مع اعتماد فرضية التشوهات الصغيرة، وباعتبار أننا سنهتم بدراسة الاهتزازات في المنطقة البعيدة نسبياً عن نقطة الرص ($r \geq 9m$) فقد تم الحساب باعتبار سلوك التربة خطي مرن (Linear Elastic) مع تخامد لزج نوع ريليه. باعتبار حالة التناظر الدوراني للمسألة حول المحور الشاقولي المار من مركز الوزن الساقط قمنا بتقسيم التربة المراد رصها لعناصر محددة رباعية الأضلاع متناظرة محورياً (Axisymmetric Quadrilateral Finite Element). من أجل تفادي تأثير الأمواج المنعكسة على حدود الموديل على نتائج الحساب، قمنا بإبعاد حدود الموديل بمقدار كاف عن المنبع الديناميكي (الوزن الساقط) وذلك باختيار طول وعمق الموديل LXH كبيرين كفاية لتجنب ظاهرة تداخل الأمواج المنعكسة على حدود الموديل مع الأمواج المنتشرة ضمن النافذة الزمنية المعتبرة للحساب.

4- البارامترات المطلوبة للنمذجة :

من أجل الحساب العددي يلزم تحديد البارامترات التالية وإدخالها في برنامج الحساب ABAQUS:
 - خواص التربة: معامل يونغ E ، معامل بواسون μ ، نسبة التخماد ξ والكتلة الحجمية ρ . - خواص الوزن الساقط: الكتلة M ، نصف القطر r_0 ، ارتفاع السقوط H (نستنتج منها تابع التحميل الديناميكي المطبق على سطح التربة) - بارامترات التقسيم الفراغي والزمني.

النتائج والمناقشة:

1- تحقيق الموديل

المعطيات الحقلية

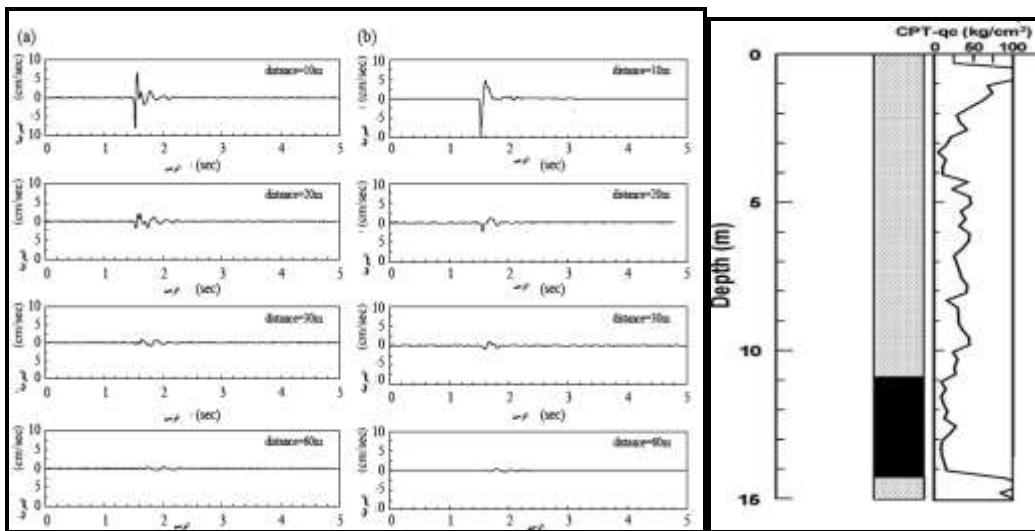
نظراً لعدم تمكننا من إجراء قياسات حقلية للاهتزازات الناتجة عن الرص الديناميكي للتربة (لعدم توفر أجهزة القياس اللازمة من جهة، وللكلفة المرتفعة لمثل هذه القياسات من جهة أخرى) فقد لجأنا إلى تحقيق الموديل على قياسات حقلية للاهتزازات المنتشرة في التربة عند استخدام الرص الديناميكي للتربة بالوزن الساقط في منطقة صناعية بالقرب من شاطئ البحر في تايوان والتي حصلنا عليها بنتيجة البحث المرجعي [1]. تم إجراء التحريات اللازمة لتحديد المقطع الجيولوجي لتربة الموقع قبل الرص فوجد أنه يتألف من ثلاث طبقات كالتالي:

1- طبقة علوية من الرمل السيلتي الرمادي تمتد لعمق يصل إلى (11m).

2- طبقة متوسطة من الغضار السيلتي قليلة السماكة نسبياً (2-3m).

3- طبقة سفلية من التربة الحصوية تمتد لعمق كبير (60-120 m).

يبين الشكل (4) نتائج تجربة الاختراق المخروطي (CPT) لتربة الموقع والتي استخدمناها لاستنتاج قيم معامل يونغ لطبقات التربة. تم إجراء الرص باستخدام كتلة بيتونية $M=25t$ تسقط من ارتفاع $H=15m$ مع إجراء قياس للاهتزازات على سطح الأرض في نقاط تبعد عن مركز الوزن الساقط مسافة $r=10, 20, 30, 60m$ على التوالي. يبين الشكل (5) نتائج القياسات الحقلية لكل من المركبتين الشاقولية V_v والأفقية V_L للاهتزاز في نقاط القياس المذكورة [1]:



الشكل (4) قيم CPT المقاسة في الحقل الشكل (5) نتائج القياسات الحقلية للاهتزازات الناتجة عن الرص الديناميكي للموقع:

(a) المركبة الشاقولية V_v (b) المركبة الأفقية V_L

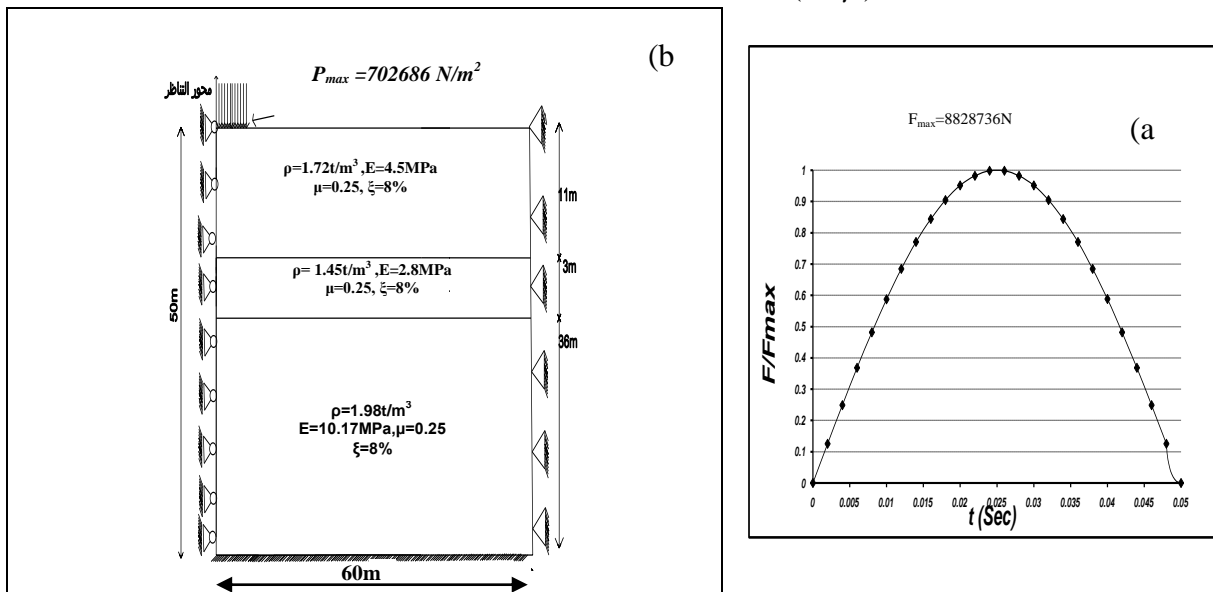
الموديل المستخدم

يبين الشكل (6) نموذج التربة وقوة الرصّ المستخدمين في الحساب. قمنا بتقسيم التربة إلى ثلاث طبقات أساسية مماثلة لطبقات تربة الموقع بالسماكة والخواص وحسبنا قيم معامل المرونة E لكل طبقة انطلاقاً من نتائج تجربة CPT الحقلية المبينة أعلاه اعتماداً على العلاقة التالية [10]:

$$E = \beta \cdot E_V : E_V = (3 - 6)q_C \quad (14)$$

حيث: E_V : عامل تشوه التربة (kPa)، q_C : مقاومة الاختراق في تجربة CPT (kPa)، β : عامل يأخذ بالحسبان التوسع الجانبي للتربة وهو يتعلق بعامل بواسون بالعلاقة [10]:

$$\beta = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (15)$$



الشكل (6) الموديل العددي المستخدم في التحقيق:

(a) نموذج قوة الرص (b) نموذج التربة

للأخذ بالحسبان تأثير العمق في قيمة معامل المرونة E قمنا بتقسيم الطبقة الواحدة إلى عدة طبقات جزئية وحساب قيمة E عند منتصف كل منها وفق

$$E_z = E_{(z=0)} \sqrt{\frac{P_{m(z)}}{P_{atm}}} \quad \text{العلاقة التالية [11]:} \quad (16)$$

حيث: p_{atm} : الضغط الجوي النظامي $p_{m(z)}$ (kPa): الضغط عند العمق المحدد ويحدد بالعلاقة التالية [11]:

$$p_{m(z)} = \frac{\gamma \cdot Z + 2(0.5 \cdot \gamma \cdot Z)}{3} + P_{atm} \quad (17)$$

حيث γ هي الوزن الحجمي للتربة (kN/m^3).

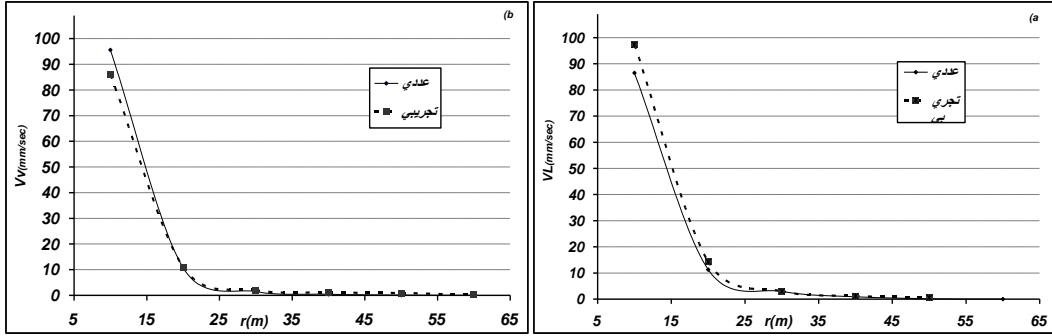
بتطبيق العلاقات السابقة استنتجنا قيم معامل يونغ E الموضحة في الشكل (6) والتي تمثل القيمة المتوسطة لقيم E_z للطبقات الجزئية. أما بالنسبة لقوة الرصّ الأعظمية F_{max} الناتجة عن سقوط الوزن على سطح التربة فقد حسبناها

بتطبيق العلاقة (5) مع اعتبار ($M=25t$, $E=4.5 \text{ MPa}$, $\mu=0.25$, $r_0=2m$, $H=20m$) ومنها يكون الضغط الأعظمي:

$$P_{\max} = \frac{F_{\max}}{\pi \cdot r_0^2} = 702686 \text{ N/m}^2$$

بعد حساب سرعة انتشار كل من أمواج الضغط C_p والأمواج السطحية C_R في كل طبقة من طبقات التربة واعتماداً على معياري اختيار Δx و Δt الممثلين بالعلاقتين (9) و (10) على التوالي اخترنا: $\Delta t=0.003\text{sec}$ و $\Delta x=0.25\text{m}$

بإدخال هذه المعطيات على الموديل المستخدم وإجراء الحساب باستخدام برنامج *ABAQUS* تم الحصول على المركبتين الشاقولية V_v والأفقية V_L للاهتزاز في كل نقطة من شبكة العناصر المنتهية. من أجل تحقيق الموديل قمنا باستنتاج منحنى التخماد لكل من مركبتي الاهتزاز الأفقية V_L والشاقولية V_v انطلاقاً من قيم مطال الاهتزاز المحسوبة في النقاط الواقعة على نفس المسافات التي تم إجراء القياسات عندها. يبين الشكل (7) مقارنة بين منحنى التخماد التجريبي والعددي لكل من المركبتين:



الشكل (7) مقارنة بين منحنى التخماد التجريبي والعددي للاهتزازات على سطح التربة:

(b) المركبة الشاقولية V_v

(a) المركبة الأفقية V_L

نلاحظ بنتيجة المقارنة أن هناك تقارباً كبيراً بين القيم المقاسة والقيم المحسوبة بالاتجاهين الأفقي والشاقولي وبالتالي نستنتج أن الموديل المقترح قادر على نمذجة الاهتزازات الناتجة عن الرصّ الديناميكي بشكل واقعي مما يبرر استخدامنا له في دراستنا العددية التالية.

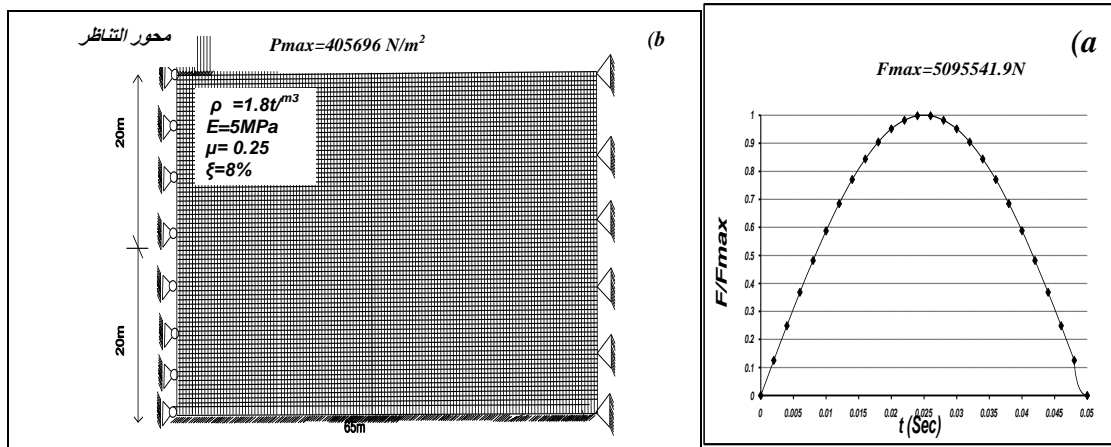
2- الدراسة العددية

نقدم في هذه الفقرة نتائج الدراسة العددية التي أجريناها لانتشار الاهتزازات الناتجة عن الرصّ الديناميكي للتربة بالوزن الساقط وأهم العوامل المؤثرة في مطال الاهتزازات علماً أننا قد بدأنا باعتبار نتائج الحساب وتحليلها بدءاً من مسافة $r=9m$ عن مصدر الاهتزاز (نقطة الرّصّ) لأن المراجع المختصة توصي بمسافة أمان أصغرية بين المنشآت المجاورة والوزن الساقط لا تقل عن 7.5m [12] [3].

المثال النموذجي :

يبين الشكل (8) المثال النموذجي المستخدم في الدراسة والذي يمثل استخدام وزن ساقط كتلته $M = 15t$ ونصف قطره $r_0 = 2m$ ويسقط من ارتفاع $H = 10m$ لرصّ تربة مفككة مواصفاتها مبينة على الشكل. اعتماداً على العلاقتين (9) و (10) اخترنا: $\Delta x=0.25m$ و $\Delta t=0.002\text{sec}$. بإجراء الحساب باستخدام *ABAQUS* نحصل

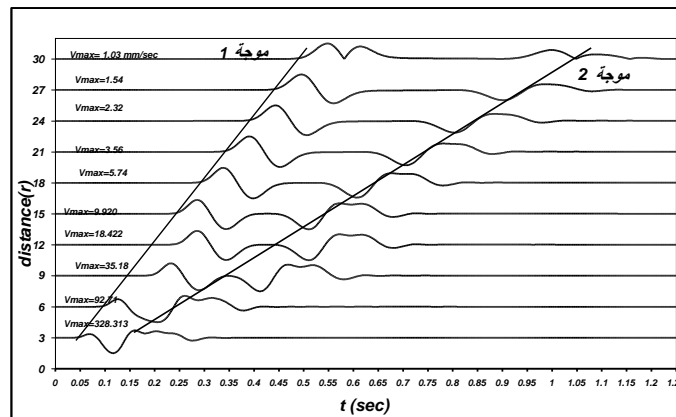
على قيم الاهتزازات في جميع نقاط شبكة العناصر المنتهية مما يسمح لنا بتتبع نشوء الأمواج وانتشارها وتخمدها في التربة.



الشكل (8) نموذج الرص الديناميكي المدروس:

(a) نموذج قوة الرص (b) نموذج التربة

يبين الشكل (9) سيسموغرام (Seismogram) للإشارة الزمنية للمركبة الأفقية للاهتزازات المحسوبة على سطح التربة بتباعد $3m$ عن الوزن الساقط والذي يسمح بتقدير عدد الأمواج الاهتزازية المنتشرة في التربة، سرعة انتشار كل موجة، نوع الأمواج وتغير مطال الاهتزاز مع ازدياد المسافة عن المصدر (علاقة التخامد).



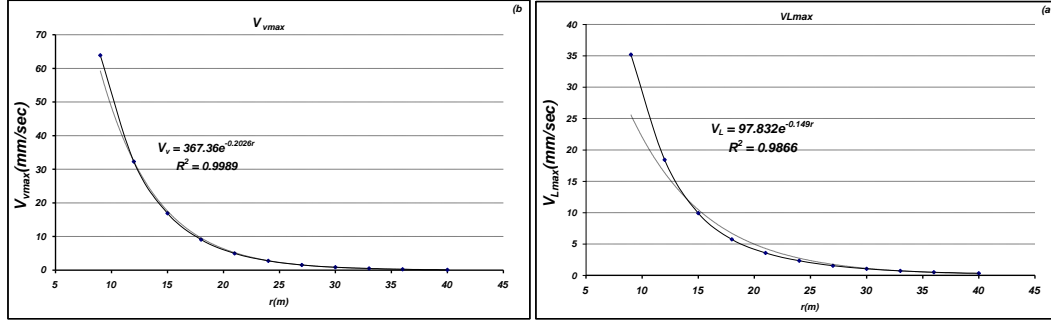
الشكل (9) سيسمو غرام للإشارة الزمنية للمركبة الأفقية للاهتزازات المحسوبة على سطح التربة.

مثلاً، يمكن أن نميز بوضوح على السيسموغرام وجود موجتين اهتزازيتين سرعة انتشار الأولى (الموجة 1) ضعف سرعة انتشار الثانية (الموجة 2) تقريباً. لتحديد نوع الموجتين نحسب أولاً سرعة انتشار كل منهما C وذلك بحساب ميل المستقيم الممثل لها فنحصل على:

$$C_1 \approx \frac{(30 - 6)}{(0.48 - 0.05)} = 62.7 \text{ m/sec}$$

$$C_2 \approx \frac{(30 - 6)}{(1.08 - 0.15)} = 29.03 \text{ m/sec}$$

ثم نقارن القيم الناتجة مع قيم $C_p=57.735$ m/sec و $C_s=33.333$ m/sec و $C_R=30.667$ m/sec المحسوبة من العلاقات (1) و (2) و (3) على التوالي ، فنجد أن الموجة الأولى هي أقرب إلى موجة ضغط P والموجة الثانية هي أقرب إلى موجة سطحية R.، يبين الشكل (10) منحنى تخامد كل من المركبتين الأفقية والشاقولية للاهتزازات المحسوبة على سطح التربة بتباعد 3m واعتباراً من مسافة $r=9$ m من نقطة الرص.



الشكل (10) منحنيات التخماد للاهتزازات المحسوبة على سطح التربة

(b) المركبة الشاقولية V_v

(a) المركبة الأفقية V_L

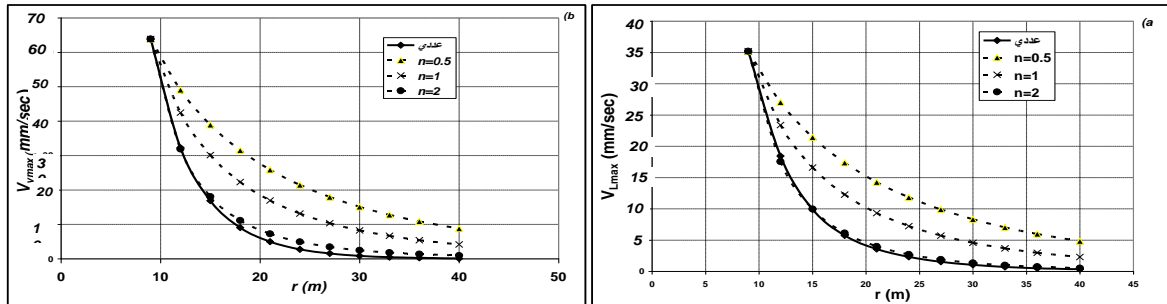
نلاحظ من هذا الشكل ما يلي:

- في حالة رص تربة متجانسة تكون الاهتزازات في الاتجاه الشاقولي أكبر منها في الاتجاه الأفقي.
- يتناقص مطال مركبتي الاهتزاز الأفقية والشاقولية مع ازدياد المسافة عن نقطة الرص. تظهر المقاربة الرياضية (Mathematical Fit) أنه يمكن التعبير عن تناقص المطال مع البعد بعلاقة التخماد المبسطة التالية مع قيم عالية جداً لعامل تحديد منحنى الاتجاه (Coefficient of Determination of Curve Fit) R:

$$V_{max} = a.e^{-b.r} \quad (18)$$

حيث a و b معلمتان عدديتان يتعلق الأولى (a) بمطال الاهتزاز بالقرب من الوزن الساقط (على بعد r_0)، في حين يعبر الثاني (b) عن التخماد الكلي (هندسي ومادي) للاهتزازات.

من أجل تحديد نوع الأمواج المسيطرة في الإشارات الزمنية للاهتزازات المحسوبة على سطح التربة في الاتجاهين الأفقي والشاقولي قمنا بمقارنة منحنى التخماد لكل من المركبتين مع منحنيات التخماد الثلاثة المحسوبة انطلاقاً من علاقة بورتينيز (العلاقة 4) مع أخذ $n=0.5$ ، $n=1$ و $n=2$ مع فرض قيمة عامل التخماد المادي $\alpha=0.04m^{-1}$ (اعتماداً على الجدول (2) وبفرض أن التربة رخوة وتردد الاهتزازات مساوٍ 10 Hz). يبين الشكل (11) نتائج المقارنة:

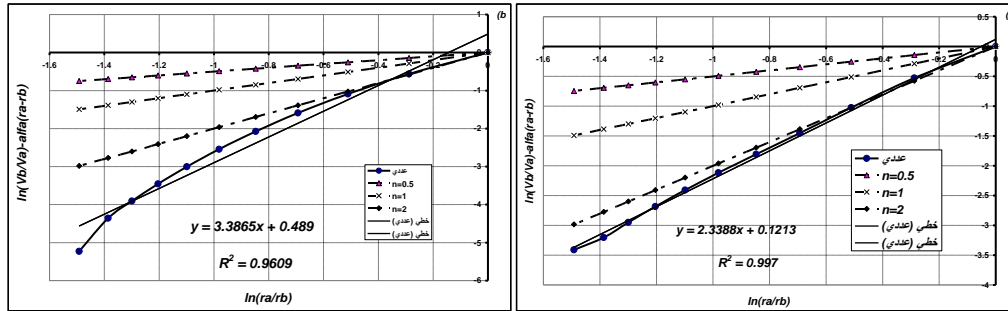


الشكل (11) معايرة (Calibration) معادلة التخماد ليورتينيز على منحنى التخماد العددي مع تغيير قيم عامل التخماد الهندسي n

(b) المركبة الشاقولية V_v

(a) المركبة الأفقية V_L (من أجل $\alpha=0.04m^{-1}$)

نستنتج من هذا الشكل أن مطال الاهتزازات المحسوبة تتناقص بشكل متناسب أكثر ما يكون مع $(1/r^2)$ أي $n=2$ مما يشير إلى موجة حجمية تنتشر على سطح التربة (حسب الجدول 1) ومن ثمّ الأمواج المسيطرة في الاتجاهين الأفقي والشاقولي هي أمواج حجمية P، من أجل تحديد قيمة n الواجب استخدامها في حال أردنا استخدام علاقة تخامد بورنينتز السابقة للتنبؤ بمطال الاهتزازات الناتجة عن الرص الديناميكي يمكن إعادة تمثيل الشكل (11) بشكل لوغارتمي مما يسمح باستنتاج قيمة n المساوية لميل منحنى الاتجاه الخطي:



الشكل (12) تمثيل لوغارتمي يعتمد على علاقة بورنينتز لمنحنى تخامد الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة (من أجل $\alpha=0.04m^{-1}$):
(a) المركبة الأفقية V_L (b) المركبة الشاقولية V_V

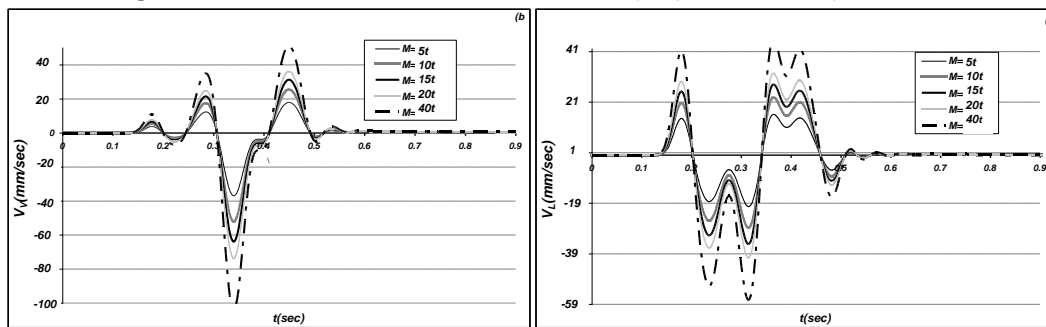
نلاحظ من الشكل أن قيمة عامل التخامد الهندسي n التي تعطي أفضل مقارنة للناتج العددية باستخدام علاقة بورنينتز هي $n=2.34$ للاهتزازات الأفقية و $n=3.39$ للاهتزازات الشاقولية،

العوامل المؤثرة في مطال الاهتزاز:

1- تأثير كتلة الوزن الساقط:

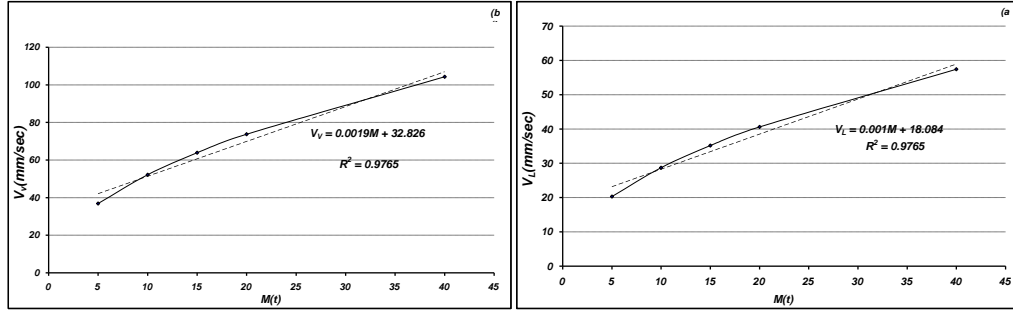
من أجل دراسة تأثير كتلة الوزن الساقط M قمنا بإجراء الحساب العددي من أجل خمس قيم مختلفة لـ M

(M=5, 10, 15, 20, 40t). يبين الشكل (13) الاهتزازات الأفقية والشاقولية المحسوبة على سطح التربة:



الشكل (13) تأثير كتلة الوزن الساقط على الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص:
(a) المركبة الأفقية V_L (b) المركبة الشاقولية V_V

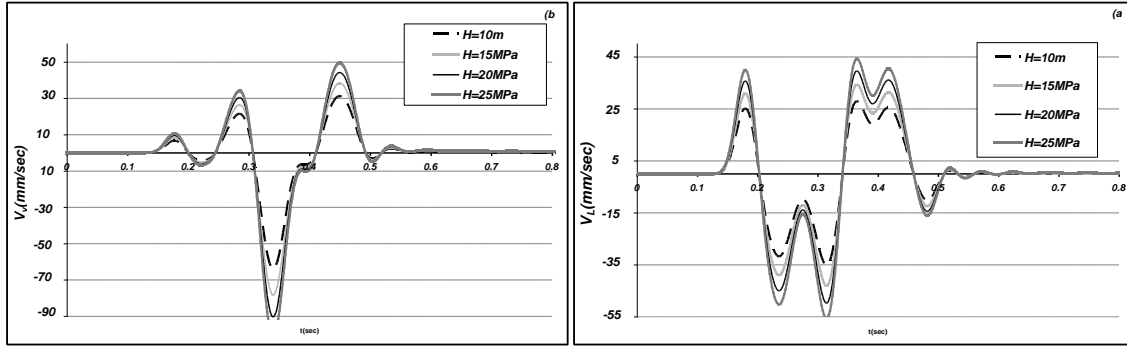
نلاحظ من الشكل أن مطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة تتناسب طردياً مع كتلة الوزن الساقط مع ملاحظة أن سرعة انتشار الأمواج الاهتزازية الناتجة تبقى ثابتة. يوضح الشكل (14) العلاقة بين مطال المركبتين الأفقية والشاقولية للاهتزازات المحسوبة عند البعد الأصغري المقبول عملياً عن نقطة الرص $r=9m$ وكتلة الوزن الساقط M. نستنتج من الشكل وجود علاقة طردية خطية بين مطال كلتا مركبتي الاهتزاز وكتلة الوزن الساقط.



الشكل (14) العلاقة بين كتلة الوزن الساقط ومطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص: المركبة الأفقية V_L (a) المركبة الشاقولية V_V (b)

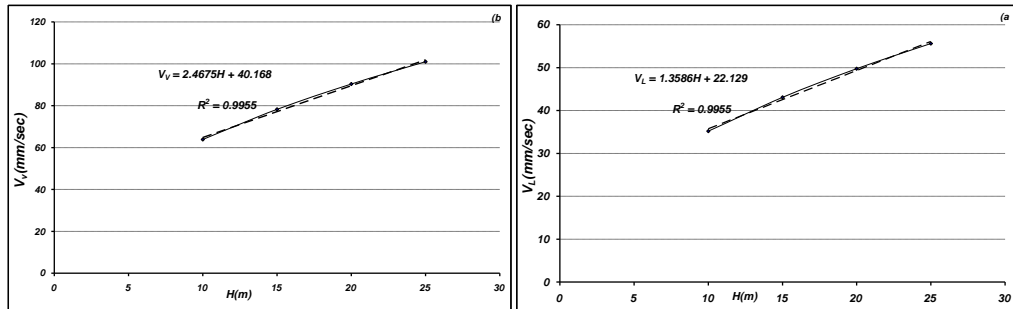
2- تأثير ارتفاع السقوط:

يبين الشكل (15) الاهتزازات الأفقية والشاقولية المحسوبة على سطح تربة المثال النموذجي وعلى بعد $r=9m$ من نقطة الرص من أجل أربع قيم مختلفة (H=10,15,20, 25m) للوزن الساقط الذي كتلته $M=15t$:



الشكل (15) تأثير ارتفاع السقوط على الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص: المركبة الأفقية V_L (a) المركبة الشاقولية V_V (b)

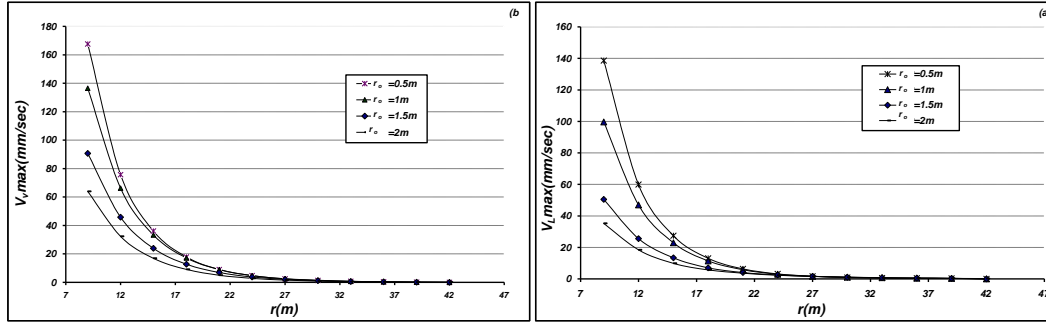
نلاحظ أن تأثير ارتفاع السقوط H مشابه تماماً لتأثير كتلة الوزن الساقط M والذي يتمثل بزيادة مطال الاهتزازات الأفقية والشاقولية مع زيادة H من جهة، وعدم التأثير على سرعة انتشار الأمواج من جهة أخرى. يوضح الشكل (16) تزايد مطال الاهتزازات بشكل خطي مع زيادة ارتفاع السقوط:



الشكل (16) العلاقة بين ارتفاع السقوط ومطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص: المركبة الأفقية V_L (a) المركبة الشاقولية V_V (b)

3- تأثير نصف قطر الوزن الساقط:

من أجل دراسة تأثير نصف قطر الوزن الساقط r_0 على مطال الاهتزازات أجرينا الحساب على المثال النموذجي من أجل ($r_0=0.5, 1, 1.5, 2m$) مع أخذ تأثير r_0 على حساب F_{max} بالحسابان في كل مرة. يبين الشكل (18) منحنيات التخامد للاهتزازات الأفقية والشاقولية المحسوبة على سطح التربة من أجل قيم r_0 المختلفة:



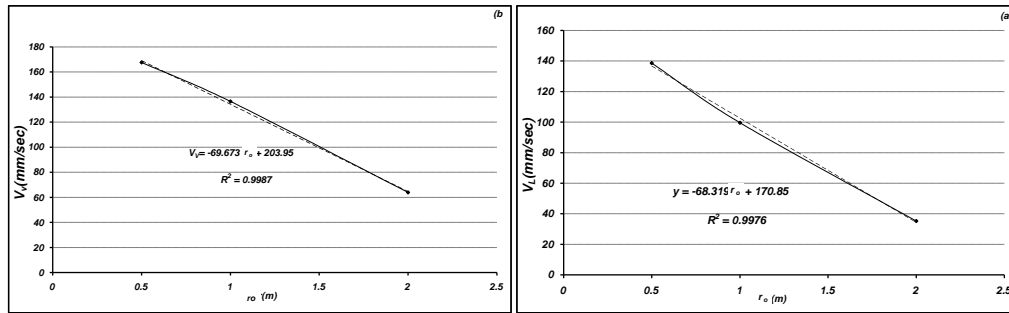
الشكل (18) تأثير نصف قطر الوزن الساقط على مطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة:

(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

نلاحظ من الشكل أن مطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة تتناسب عكساً مع نصف قطر وزن ذي كتلة معينة يسقط من ارتفاع ثابت على تربة معينة ويعود ذلك إلى تناقص ضغط الرص P_{max} المطبق على سطح التربة.

تبين المنحنيات التالية تغير مطال الاهتزاز مع الزمن عند أقرب نقطة قياس من مصدر الاهتزاز وهي 9m. يظهر من الشكل (19) الذي يمثل تغير مطال مركبتي الاهتزاز على مسافة $r=9m$ من نقطة الرص مع تغير r_0 أن مطال الاهتزازات يتناقص بشكل خطي مع ازدياد r_0 .



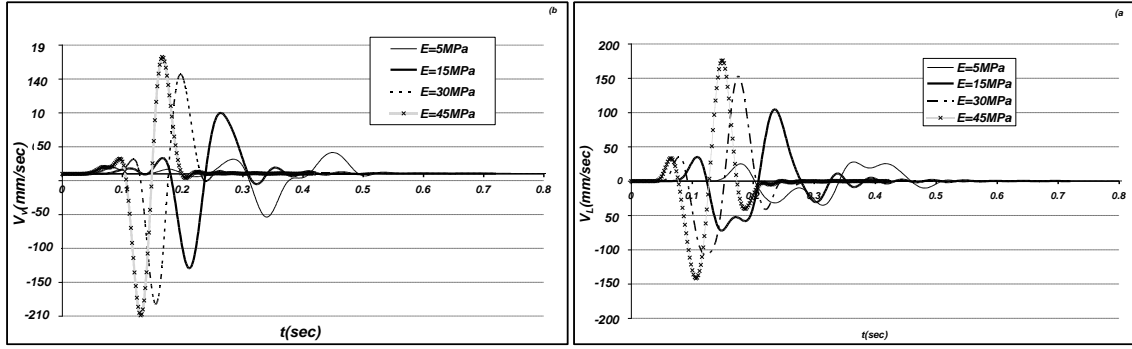
الشكل (19) العلاقة بين نصف قطر الوزن الساقط ومطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص:

(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

4- تأثير معامل مرونة التربة:

دراسة تأثير معامل مرونة التربة E في الاهتزازات المنتشرة على سطح التربة قمنا بإجراء الحساب العددي من أجل أربع قيم مختلفة ($E=5, 15, 30, 45$ MPa).



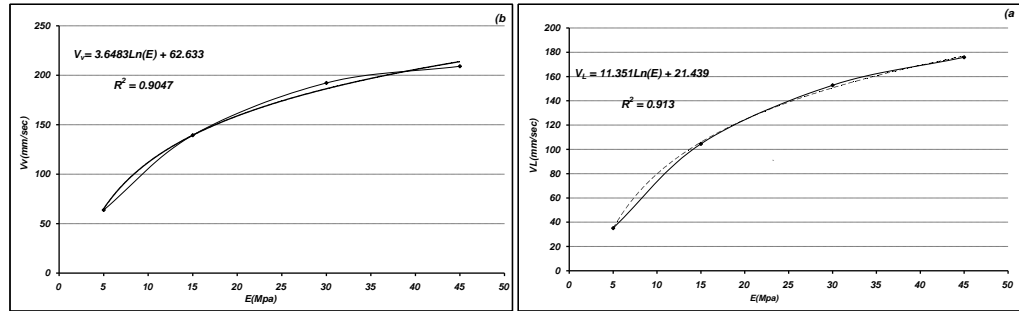
الشكل (20) تأثير معامل يونغ للتربة على مطال الاهتزازات المحسوبة على سطحها على بعد $r=9m$ من نقطة الرص:

(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

نلاحظ من الشكل أن زيادة قيمة معامل يونغ للتربة يؤدي إلى زيادة مطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة من جهة، وزيادة سرعة انتشار الأمواج الاهتزازية في التربة من جهة أخرى و يمكن تفسير هذه النتيجة بأن زيادة E تؤدي، من جهة، إلى زيادة قوة الرص الديناميكي الأعظمية F_{max} التي يجب إدخالها في الموديل العددي (العلاقة 8) مما يؤدي إلى زيادة مطال الاهتزازات الناتجة، ومن جهة أخرى تزيد من سرعة انتشار الأمواج الاهتزازية التي تزداد بزيادة E كما يظهر من العلاقات (1) و (2) و (3).

يبين الشكل (21) تغير مطال مركبتي الاهتزاز على مسافة $r=9m$ من نقطة الرص مع تغير E (ومن ثم F_{max}). نلاحظ أن هناك تزايداً لوغاريتمياً لمطال الاهتزازات مع زيادة عامل مرونة التربة E .



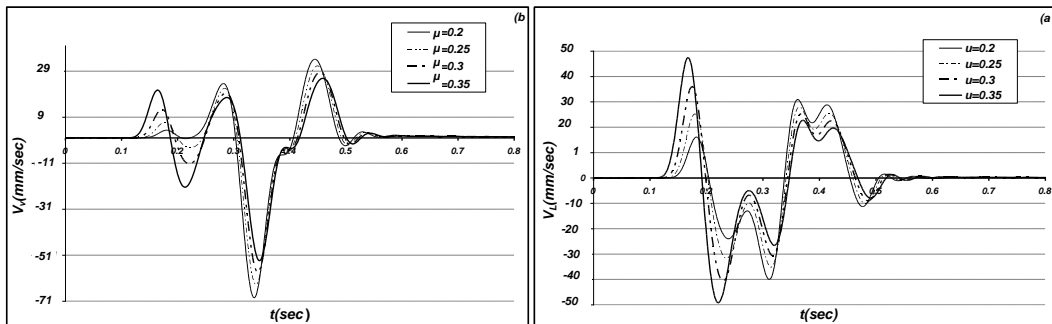
الشكل (21) العلاقة بين معامل يونغ للتربة ومطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص:

(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

5- تأثير معامل بواسون:

يبين الشكل (22) تأثير معامل بواسون في الاهتزازات الأفقية والشاقولية المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص من أجل أربع قيم لمعامل بواسون $(0.2, 0.25, 0.3, 0.35)$:



الشكل (22) تأثير معامل بواسون على مطال الاهتزاز على بعد $r=9m$ من نقطة الرص.

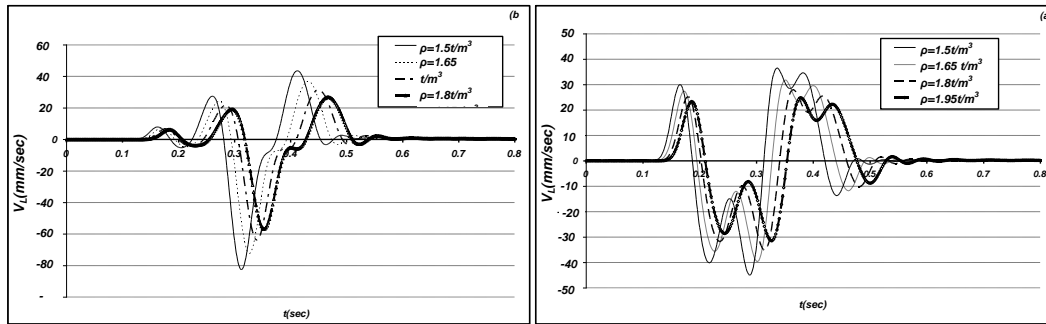
(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

بعد تحليل المنحنيات السابقة نلاحظ أن زيادة معامل بواسون تؤدي إلى تناقص مطال الاهتزاز في الاتجاه الشاقولي، وزيادة مطال الاهتزاز في الاتجاه الأفقي.، زيادة طفيفة في سرعة انتشار الأمواج.

6- تأثير الكتلة الحجمية للتربة :

يبين الشكل (23) الاهتزازات الأفقية والشاقولية المحسوبة على سطح التربة النموذجية السابقة وعلى بعد $r=9m$ من نقطة الرص وذلك من أجل أربع قيم مختلفة للكتلة الحجمية للتربة ($\rho=1.5, 1.65, 1.8, 1.95 t/m^3$):

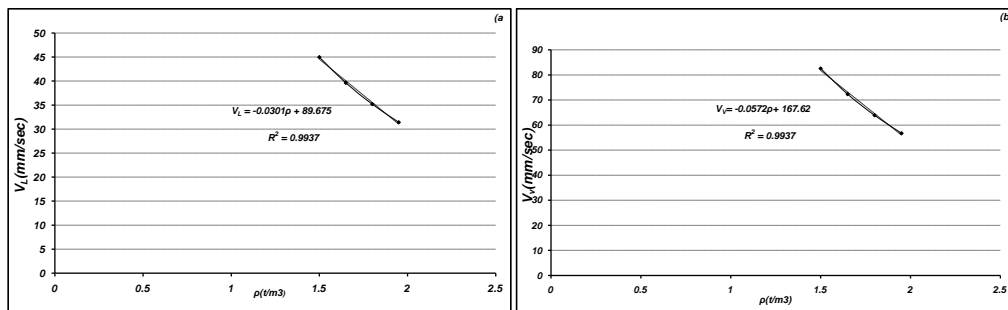


الشكل(23) تأثير الكتلة الحجمية للتربة على الاهتزازات المحسوبة على سطحها على بعد $r=9m$ من نقطة الرص:

(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

نلاحظ أن زيادة الكتلة الحجمية للتربة تؤدي إلى تناقص خطي لمطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة كما هو موضح في الشكل (24)، تناقص في سرعة انتشار الأمواج الاهتزازية في التربة.



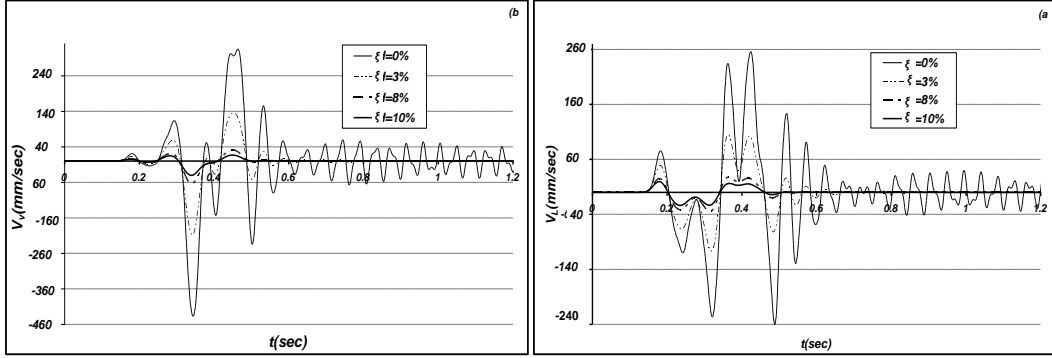
الشكل(24) تأثير الكتلة الحجمية للتربة على الاهتزازات المحسوبة على سطحها على بعد $r=9m$ من نقطة الرص:

(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

7- تأثير نسبة التخماد

من أجل دراسة تأثير نسبة التخماد أخذنا القيم التالية لنسبة التخماد (ζ) (0,3,8,10%)، واستنتجنا المنحنيات التالية التي توضح الاهتزازات الأفقية والشاقولية على بعد $r=9m$ من نقطة الرص:

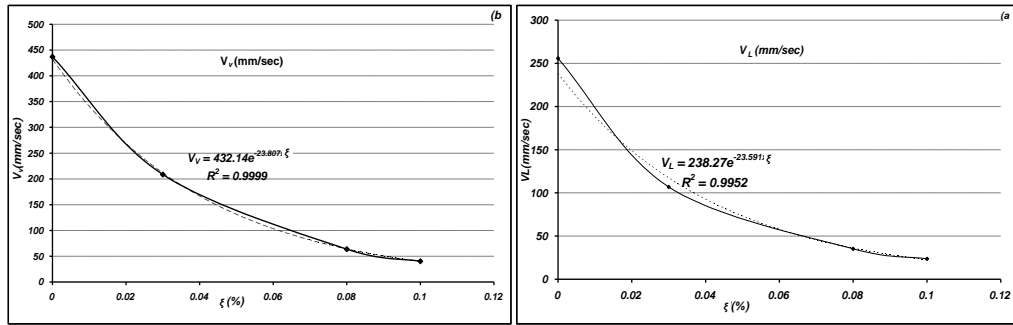


الشكل (25) تأثير نسبة التخماد على الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص.

(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

بعد تحليل المنحنيات السابقة نلاحظ أنّ نسبة التخماد تؤثر بشكل مباشر في مجال الاهتزازات المنتشرة في التربة حيث يتناقص مجال الاهتزاز مع زيادة نسبة التخماد، لكن نسبة التخماد لا تؤثر في سرعة انتشار الأمواج الاهتزازية في التربة. يبين الشكل (26) تغير مجال الاهتزاز مع تغير نسبة التخماد.



الشكل (26) تأثير نسبة التخماد على الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة على بعد $r=9m$ من نقطة الرص.

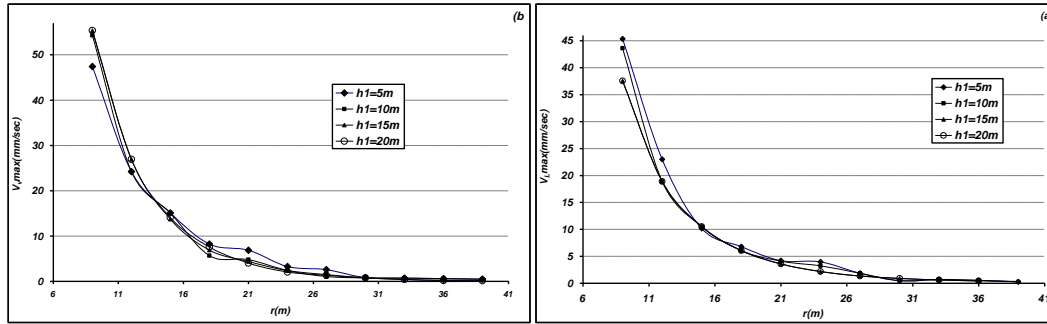
(a) المركبة الأفقية V_L

(b) المركبة الشاقولية V_V

نلاحظ من المنحنيات السابقة العلاقة الأسية التي تربط بين مجال الاهتزاز ونسبة التخماد.

8- تأثير سماكة الطبقة العليا للتربة

سندرس في هذه الفقرة تأثير سماكة الطبقة العليا في مجال الاهتزازات حيث قسمنا مقطع التربة النموذجي الموضح في الشكل (8b) إلى طبقتين أفقيتين وغيرنا سماكة الطبقة العليا h_1 ضمن القيم التالية ($h_1=5,15,20m$) مع المحافظة على سماكة مقطع التربة الكلي ($H=h_1+h_2=40m$). وثبتت قيم معامل يونغ للطبقة العليا ($E_1=5MPa$) ولطبقة السفلى ($E_2=100MPa$). يبين الشكل (27) منحنيات التخماد الناتجة:



الشكل (27) تأثير سماكة الطبقة العليا للتربة على الاهتزازات المحسوبة على سطحها على بعد $r=9m$ من نقطة الرص. المركبة الأفقية V_L (a) المركبة الشاقولية V_V (b)

نلاحظ من الشكل أن تغير سماكة الطبقة العلوية من 4 إلى 20m لم يؤد إلى تغير ملحوظ في قيم مطال الاهتزاز وشكل منحنى التخامد ومن ثم يمكن القول إن مطال الاهتزاز على سطح التربة يتعلق بشكل أساسي بخواص الطبقة العلوية للتربة وليس بسماكتها.

الاستنتاجات والتوصيات:

تضمن هذا البحث دراسة عددية بطريقة العناصر المنتهية لانتشار الاهتزازات الناتجة عن الرص الديناميكي للتربة بطريقة الوزن الساقط للتربة وأهم العوامل المؤثرة في مطال الاهتزازات المحسوبة على سطح التربة. من أجل إجراء الدراسة قمنا بوضع موديل عددي أظهر تحقيقه على قياسات حقلية تقارباً كبيراً بين النتائج العددية والحقلية. بعد تحقيق الموديل قمنا باستخدامه لتحليل أنواع الأمواج الاهتزازية المنتشرة في التربة نتيجة رصها وإيجاد علاقة تخامدها وتحديد أهم العوامل المؤثرة في مطال الاهتزازات الناتجة، وقد توصلنا إلى العديد من النتائج التي تم ذكرها في سياق البحث والتي يمكن تلخيص أهمها بالنقاط التالية:

- تتضمن الاهتزازات الناتجة عن الرص الديناميكي للتربة أمواجاً مختلفة ولكن الأمواج المسيطرة بينها هي أمواج الضغط P .

- يتناقص مطال الاهتزازات المنتشرة في التربة في الاتجاهين الأفقي والشاقولي مع ازدياد المسافة عن الوزن الساقط أو نقطة الرص. يمكن التعبير عن تخامد الاهتزازات بعلاقة مبسطة من الشكل: $V_{max} = a.e^{-b.r}$.

- يظهر الشكل الأسّي لهذه العلاقة بوضوح أهمية التخامد المادي في التربة (نسبة التخامد ξ في الموديل).

- أظهرت الدراسة البارامترية أن مطال الاهتزازات على سطح التربة على بعد معين من نقطة الرص يتزايد بشكل خطي مع تزايد كل من كتلة الوزن الساقط وارتفاع سقوطه وبشكل لوغاريتمي من أجل معامل يونغ للتربة، في حين يتناقص هذا المطال بشكل خطي مع زيادة كل من الكتلة الحجمية للتربة ونصف قطر الوزن الساقط وبشكل أسّي مع زيادة التخامد المادي في التربة. في حين يختلف تأثير معامل بواسون للتربة في الاتجاهين الأفقي والشاقولي.

المراجع:

1. HWANG, J.; TU ,T. *Ground Vibration Due to Dynamic Compaction* . Soil Dynamics and Earthquake Engineering.Vol.26, 2006, 337-346
2. PAN,J.;SELBY,A. *Simulation of Dynamic Compaction of Loose Granular Soils*. Advances in Engineering Software.Vol. 33, 2002, 631-640.
3. CHOW,Y.K.; YONG, D.; YONG, K.; Lee, S. *Dynamic Compaction of Loose Granular Soils: Effect of Print Spacing*, Journal of geotechnical Engineering ,Vol .120,No.7, July 1994, 1115-1133.
4. AMIK, H.; XU, T.; GENDREAU, M. *The role of building and slabs –on –grade in the suppression of low-amplitude ambient ground vibrations*, International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering California,3rdICEFGE, 2004, 1-5.
- 5.WOODS, R.S.; JEDELE, L.P. *Energy–Attenuation Relationships from Construction Vibrations*,GeotechnicalEngineering Special Technical Publication ASCE, 1985, 231-246.
6. WOODS, RD. *Screening of surface waves in soils*, Soil Mech Found Div ASCE Detriot,Vol .94, No. SM4,1968; 951-979.
7. ROUAIGUIA, A.; AL.; ZHRANI, R. *Simulation of Soil Dynamic Compaction*.The 6th Saudi Engineering Conference Dhahran ,Vol .3 ,No.16,2002, 223-232.
8. RICHART, F.; HALL, J.; WOODS, R. *Vibrations of Soils and Foundations*, Canadian Geotechnical Journal, New Jersey, No 8 ,1971,354.
9. CLOUGH, R.W.; PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*, McGraw Hill Companies, Inc New York. 1993, 234.
- 10.BOWELS, J.E. *Foundation Analysis and Design*, 4thEdition, McGraw Hill Australia,1983, 278.
11. EHADE, F.; SHAHROUR, I. *Analysis of closely twin tunneles in urban area*, Acted du colloque international de Geotechnique, Beyrouth,19-22Mai, 2004, 221-226.
- 12.ARSENOVIC, D.; VRHOVAC, S.; JAKSIC, Z.; BUDINSKI-PETKOVIC, Lj.; BELIC, A. *Simulation Study of Granular Compaction Dynamics Under Vertical Tapping* ,Material Science Forum Serbia, Vol .555, 2007, 107-112.

مواقع انترنت

- 13.www.TERRASYSTEM.com
- 14.http://en.wikipedia.org/wiki/seismic_wave/