

دراسة عددية لاستخدام طرق تحليل تجارب الصدم غير المخربة في اختبار سلامة الأوتاد البيتونية

الدكتور رامي العبدہ *

علي صبح **

(تاريخ الإيداع 26 / 2 / 2017. قُبل للنشر في 11 / 5 / 2017)

□ ملخص □

يتضمن هذا البحث دراسة عددية بطريقة العناصر المنتهية تهدف إلى تقييم قابلية ودقة استخدام طريقة الإستجابة للصدمة غير المخربة في تخمين الطول والمقطع العرضي لوتد بيتوني سليم (غير مشوه) في المجالين الزمني والتردد. من أجل ذلك، قمنا بوضع موديل عددي مناسب للمسألة يعتمد على نمذجة كل من قوة الصدم (حمولة نبضية) ووسط الإنتشار (التربة + الوتد) وإدخاله في برنامج الحساب العددي 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 إنتشار الإهتزاز في الوتد والنتائج عن الحمولة النبضية المطبقة على رأس الوتد وتوصلنا الى رسم منحنى الإستجابة الميكانيكية للوتد وتحديد كل من طوله ومساحة مقطعه. أخيراً، أجرينا دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة على إنتشار الإهتزاز الناتج عن الحمولة النبضية المطبقة على رأس الوتد (صلابة التربة المحيطة بالوتد، طول الوتد المغروز في التربة) وتأثيرها على دقة التنبؤ بطول الوتد وسطح مقطعه. أجريت الدراسة البارامترية في مجالين: الزمني اعتماداً على التحليل المباشر للسجلات الزمنية للانتقال والسرعة الجزئيين، والتردد اعتماداً على تحليل منحنى الإستجابة الميكانيكية للوتد. تمكننا نتائج هذا البحث من استخدام الموديل العددي المقترح للحصول عددياً على السجلات الزمنية للانتقال والسرعة الجزئيين وكذلك منحنى الإستجابة الميكانيكية المحسوبة عند رأس الوتد والتي تشكل مخططات مرجعية تستخدم لاحقاً للمقارنة مع المخططات المماثلة الناتجة عن الاختبار الحقلى للأوتاد المنفذة والتوصل بالنتيجة إلى اختبار سلامة الأوتاد وكشف التشوهات في جسمها إن وجدت. كذلك يمكننا من تحديد حدود استخدام كل من طريقتي التحليل المعتمدين في البحث واختيار الأفضل بينهما حسب الحالة المدروسة.

الكلمات المفتاحية : طريقة العناصر المنتهية، اختبار سلامة الأوتاد، تجارب الصدم غير المخربة، السجلات

الزمنية للإهتزازات، تابع قابلية الحركة، منحنى الإستجابة الميكانيكية للوتد، المجالين الزمني والتردد، ABAQUS.

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

** طالب ماجستير - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

Numerical study of the use of Non-destructive Impact Test methods for the exam of integrity of concrete piles

Dr. Rami Alabdeh*
Ali Sebeh**

(Received 26 / 2 / 2017. Accepted 11 / 5 / 2017)

□ ABSTRACT □

This research includes a numerical study using Finite Element Method aims to evaluate the ability and accuracy of using Non-destructive Impact Response Method in the assessment of length and cross-sections of intact concrete pile (not deformed) in both time and frequency domains. Therefore, an appropriate numerical model depends on the modeling of both impact force (impulsive load) and distributing medium (pile + soil) and insert them in computing software ABAQUS was carried out. The numerical model was verified corresponding to field measures obtained from literature review and the results showed good agreement between measures and numerical results. Furthermore, the model was applied on a typical example in order to study vibration distribution in the pile due to impulsive load applied on pile top. Mechanical response curve of intact pile was obtained. Then, both of length and cross-section area of the pile were determined. Finally, parametrical study of most important factors (stiffness of soil surrounding the pile and length of pile embedded in the soil) effect on vibration distribution resulted from impulsive load applied on pile top. The parametrical study was carried out in two domains; first one was time domain depending on the direct analysis of particle displacement and velocity and the second was frequency domain depending on analysis of pile mechanical response curve. The results of this research enables to use the proposed numerical model to numerically obtain the time history of particle displacement and velocity in addition to the curve of mechanical response computed in the pile top and forms reference diagrams which is used later to compare with similar diagrams resulted from field test of executed piles. As a result, pile integrity test and detecting of defects in the piles if any. In addition, the limits of the use of both analysis methods adapted in research and choose the best between them according to the case study.

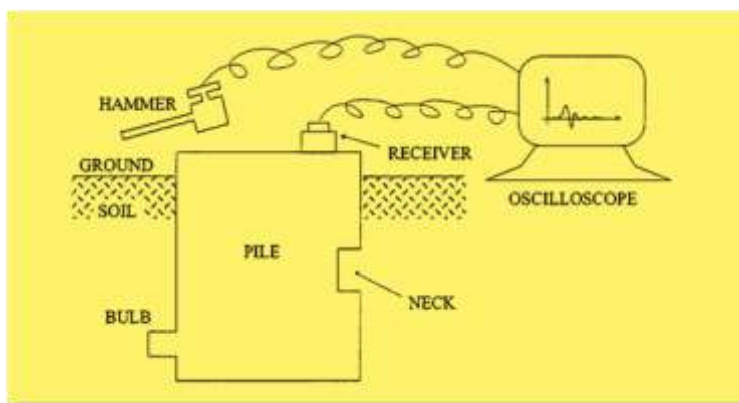
Keywords: finite element method, Pile Integrity Test, impulsive load, non-destructive impact tests, vibration time history, mobility function, pile mechanical response curve, time and frequency domains, ABAQUS.

* 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:

إن التأسيس على الأوتاد معروف منذ القدم وقد تطور تطوراً كبيراً مع التطور العلمي وتطور طرق التنفيذ حتى وصل إلى وضعه الحالي المعروف حيث يعتبر أكثر أنواع الأساسات العميقة انتشاراً. يستخدم التأسيس على الأوتاد من أجل تأسيس مختلف المنشآت الهندسية الضخمة من خزانات وركائز جسور وأبنية عالية وصوامع حبوب..... الخ. لضمان سلامة هذه المنشآت كان لابد من وجود طرق لتقييم سلامة جسم الوتد بعد تنفيذه ضمن التربة لتحديد مدى صلاحيته في نقل حمولات المنشأ إليها، حيث يتم التأكد من خلو جسم الوتد البيتوني المصبوب في المكان من التشوهات الممكن حدوثها أثناء التنفيذ والتي تقسم إلى نوعين أساسيين: إما انتفاخ ويسمى بصلة (bulb) أو تضيق ويسمى رقبة (neck). بالإضافة الى ذلك لا يمكن إهمال الضرر الذي قد تسببه الحركة الزلزالية للأوتاد البيتونية المدفونة والمصبوبة في المكان كذلك حيث يمكن أن تسبب قصاً في جسم الوتد و بالتالي حدوث انقطاع فيه. توجد طرق عديدة لتقييم سلامة الأوتاد البيتونية تصنف إلى طرق مخربة وطرق غير مخربة . من الطرق المخربة نذكر طريقة السبر الدوراني في جسم الوتد (1)، أما من الطرق غير المخربة فنذكر طريقة الإستخدام المباشر للسجلات الزمنية للانتقال الجزيئي والسرعة الجزيئية المسجلة عند رأس (قمة) الوتد (2)، طريقة تابع قابلية الحركة (Mobility Function) أو ما يسمى بطريقة القابلية الميكانيكية (Method Mechanical Admittance)(3)، و طريقة صدى الصدم (Impact Echo Method)(4). تعتمد الطرق غير المخربة على مبدأ إجراء صدمة (دقة) خفيفة (غير مخربة) على رأس الوتد ثم دراسة الإشارة المستقبلية بواسطة حساس موضوع على رأس الوتد يستقبل الإهتزاز ويسجله على شاشة راسم الإهتزاز على شكل إنتقال الجزيئي (U_2) أو سرعة جزيئية (V_2) واللذين يمثلان دورهما الإستجابة الميكانيكية للوتد المسجلة عند رأس الوتد(5) كما هو موضح بالشكل [1].



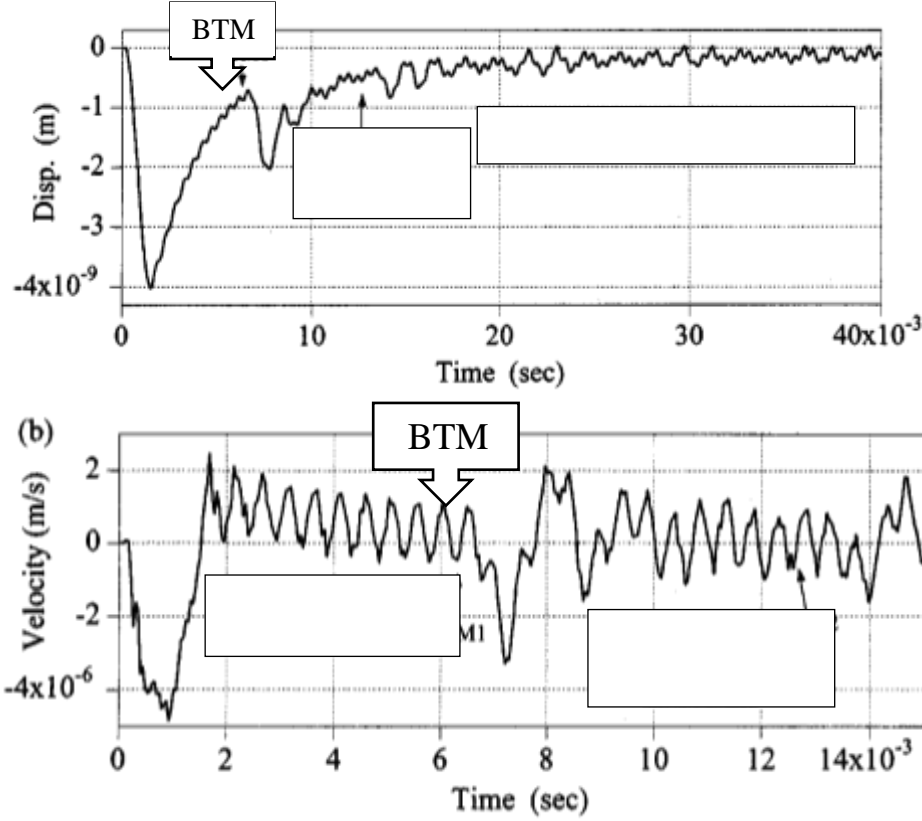
الشكل [1] مبدأ الصدم غير المخرب على رأس الوتد

تعتبر الطرق غير المخربة الأفضل والأكثر استخداماً وذلك نظراً لبساطتها وسهولة تنفيذها من جهة، ولأنها أكثر اقتصادية من جهة أخرى حيث أنها لاتلحق الضرر بالوتد كما في الطرق المخربة. سنتناول في هذا البحث اثنتين من طرق تحليل تجارب الصدم غير المخربة الأكثر استخداماً وهما: طريقة الإستخدام المباشر للسجلات الزمنية وطريقة القابلية الميكانيكية (Mechanical admittance method).

طريقة الاستخدام المباشر للسجلات الزمنية:

تعتمد هذه الطريقة على تحليل السجلات الزمنية للإنتقال والسرعة الجزئية الممثلة لاستجابة الوتد لطريقة خفيفة على رأسه وفق ما يلي:

يتم تحديد النقطة BTM على السجل الزمني للإنتقال $U_2(t)$ أو السرعة الجزئية $V_2(t)$ كما هو مبين في الشكل [2] و التي تمثل زمن وصول الموجة المنعكسة عن أسفل الوتد إلى الحساس الموجود على رأس الوتد.



الشكل [2] تحديد النقطة BTM الموافقة لزمن وصول الموجة المنعكسة إلى رأس الوتد:

(a) استخدام السجل الزمني للإنتقال (b) استخدام السجل الزمني للسرعة

يتم حساب سرعة انتشار الموجة الطولية في جسم الوتد البيتوني V_{rod} (m/sec) بالعلاقة:

$$V_{rod} = \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c}} \quad (1)$$

حيث E_c و ρ_c تمثلان معامل المرونة (معامل يونغ) (kPa) والكتلة الحجمية (t/m^3) لمادة الوتد على التوالي. استناداً إلى نظرية انتشار الموجة في وسط متجانس أحادي البعد يمكن تحديد طول الوتد البيتوني باعتبار أن زمن وصول الموجة المنعكسة يمثل الزمن الذي تستغرقه موجة الإهتزاز P لتقطع الوتد مرتين (ذهاباً وإياباً). انطلاقاً من العلاقة (1) يحسب طول الوتد الكلي L بالعلاقة التالية:

$$L = 0.5 * BTM * V_{rod} \quad (2)$$

ومنه يمكن استنتاج طول جزء الوتد المغروز في التربة.

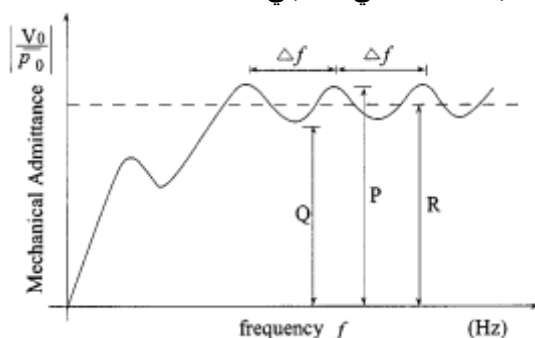
- طريقة القابلية الميكانيكية :

تعتمد على تحليل منحنى استجابة القابلية الميكانيكية (Mechanical admittance response curve) للوئد والذي نحصل عليه انطلاقاً من السجل الزمني للسرعة الجزئية بعد تحويله من المجال الزمني إلى المجال الترددي باستخدام تحويلات فورييه السريعة (Fast Fourier Transform) (FFT) ثم تحسب القابلية الميكانيكية M_a بالعلاقة (6):

$$M_a = \frac{V_0}{P_0} \quad (3)$$

حيث أن V_0 و P_0 تمثلان على التوالي القيم العقدية لتحويلات فورييه لكل من السرعة الجزئية والقوة المطبقة على رأس الوئد من أجل كل قيمة للتردد.

يبين الشكل [3] منحنى قابلية ميكانيكية نموذجي لوئد (سنقوم في بحثنا بالحصول على السجلات الزمنية بإجراء التحليل العددي باستخدام برنامج ABAQUS ثم تحويلها إلى المجال الترددي واستنتاج منحنى القابلية الميكانيكية باستخدام برنامج MATLAB). يتم تحليل هذا المنحنى كما يلي:



الشكل [3] منحنى الإستجابة الميكانيكية للوئد

تحديد منطقة الاستجابة الثابتة على المنحنى و هي الجزء من المنحنى الذي يتذبذب حول قيمة ثابتة للقابلية الميكانيكية.

-حدد من منطقة الاستجابة الثابتة القيم التالية:

P: الحد الأقصى (الذروة العليا) ، Q: الحد الأدنى (الذروة الدنيا) و Δf : فرق التردد بين ذروتين متتاليتين (علويتين أو سفليتين).

استخدام المعادلات التالية لحساب طول ومساحة مقطع الوئد:

$$R = \sqrt{P \times Q} \quad \left(\frac{m}{s.N}\right) \quad (4)$$

$$L = \frac{V_{rod}}{2\Delta f} \quad (m) \quad (5)$$

$$A_c = \frac{1}{R \cdot \rho_c \cdot V_{rod}} \quad (m^2) \quad (6)$$

L: الطول الكلي للوئد (في حالة وتد سليم) أو الطول المستمر للوئد حتى مرحلة الانقطاع (في حالة وتد تعرض للقص). A_c : مساحة مقطع الوئد. ρ_c : الكتلة الحجمية لمادة الوئد.

أهمية البحث وأهدافه

تزايد الاهتمام في السنوات الأخيرة بالطرق غير المخربة لتقييم سلامة الأوتاد البيتونية باعتبار أن هذه الطرق أكثر أماناً وأسهل استخداماً كما أنها لا تلحق أضراراً بالوتد البيتوني، وبالتالي فهي أكثر اقتصادية من الطرق الأخرى التي قد تسبب خلخلة التربة المحيطة بالوتد وإلحاق الضرر فيه. إن أغلب الدراسات الموجودة حول استخدام تجارب الصدم غير المخربة لتقييم سلامة الأوتاد البيتونية هي تجريبية حقلية خاصة بحالة معينة وموقع معين وتعتمد على الحصول على السجلات الزمنية للإنتقال أو للسرعة ومن ثم تحليلها حسب الطريقة المعتمدة وتقدير سلامة الأوتاد المعنية في الحالة المدروسة، في حين أن الدراسات العددية التي تعتمد على وضع موديل عددي يحاكي مبدأ الصدم غير المخرب ويعطي السجلات المطلوبة للتقييم عددياً في حالتها وتد سليم ووتد ذي تشوهات ومن ثم تدرس أهم البارامترات المؤثرة على فعالية تقييم سلامة الأوتاد ودقتها في حالات متنوعة من الأوتاد والتربة قليلة عملياً رغم أهمية الموضوع الكبيرة. لذلك فإن أهمية هذا البحث تنبع من كونه دراسة عددية لاستخدام الطرق التي تعتمد مبدأ الصدم غير المخرب للكشف عن سلامة الوتد وتتضمن وضع وتحقيق موديل عددي بسيط نسبياً وفعال في أن معاً يمكن استخدامه للحصول على سجلات زمنية للإنتقال الجزئي وللسرعة الجزئية مماثلة تقريباً للسجلات الحقلية في حالتها الأوتاد السليمة (موضوع بحثنا هذا) والأوتاد المشوهة (موضوع بحث لاحق). بعد تحقيق الموديل تجريبياً قمنا بتحليل السجلات الزمنية العددية في حالة الأوتاد السليمة حسب الطريقتين المذكورتين سابقاً وتقييم مدى دقة كل من الطريقتين وذلك بمقارنة قيم نتائج التحليل (طول الجزء المغروز من الوتد في التربة ومساحة مقطعه العرضي) مع قيمها المدخلة في الموديل. قمنا في النهاية بإجراء دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة على استجابة الوتد وهي صلابة التربة المحيطة بالوتد وعمق غرز الوتد في التربة ومدى تأثيرها على دقة تحليل النتائج بكل من الطريقتين المذكورتين، وبالتالي تحديد المجال الذي يكون فيه استخدام تجارب الصدم غير المخربة لتقييم سلامة الأوتاد البيتونية فعالاً.

طرائق البحث ومواده

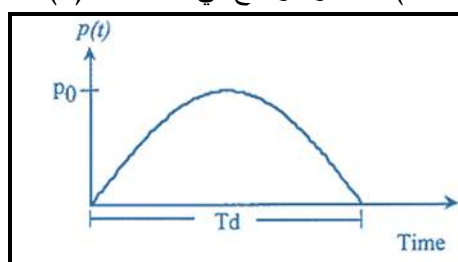
اعتمدنا في دراستنا المنهج التحليلي المقارن حيث استخدمنا طريقة العناصر المنتهية لنمذجة مسألة انتشار الإهتزازات الناتجة عن الطرق (الصدم) الخفيف على رأس وتد مغروز في التربة. قمنا أولاً بوضع موديل عددي مناسب للمسألة يعتمد على نمذجة كل من قوة الصدم والوتد والتربة وإدخاله في برنامج الحساب بطريقة العناصر المنتهية (ABAQUS) ثم تحقيق الموديل على نتائج قياسات حقلية لتجارب صدم غير مخربة حصلنا عليها بنتيجة البحث المرجعي وحصلنا على تقارب جيد بين السجلات الزمنية العددية والحقلية. قمنا بعدها بتحليل السجلات الزمنية بكل من طريقة التحليل المباشر للسجلات الزمنية (في المجال الزمني) وطريقة تابع قابلية الحركة (في المجال الترددي) وتوصلنا بالنتيجة إلى التأكد من دقة استخدام الطريقتين لحساب طول الوتد السليم ومساحة مقطعه العرضي، إضافة إلى الحصول على السجلات زمنية ومنحني الاستجابة الميكانيكية للوتد السليم والتي ستستخدم للمقارنة مع تلك التي سنحصل عليها في حالة وتد مشوه وبالتالي يمكن تحديد مكان توضع التشوه في جسم الوتد المغروز بالتربة دون الحاجة إلى حفر التربة حول الوتد. في النهاية، استخدمنا الموديل السابق الذكر لإجراء دراسة بارامترية لتأثير أهم العوامل (صلابة التربة المحيطة بالوتد وعمق غرز الوتد في التربة) المؤثرة على دقة الحساب في كل من طريقتي التحليل المذكورتين في حالة الأوتاد السليمة.

النتائج والمناقشة

الموديل العددي

1-4 نمذجة قوة الصدم:

تستوجب نمذجة تجارب الصدم غير المخربة بطريقة العناصر المنتهية معرفة قوة الصدم المطبقة على رأس الوند. وجد نتيجة قياسات تجريبية متعددة أن الحمولة الديناميكية الناتجة عن طرق رأس الوند المراد اختباره يمكن تمثيلها بتابع (قوة- زمن) بشكل نصف موجة جيبيه متخامدة (Damped Half Sine Wave) تؤثر خلال زمن قصير جداً حوالي (0.001-0.0015 sec) كما هو موضح في الشكل [4].(7)



الشكل [4] : مخطط نمونجي (قوة - زمن) للحمولة الديناميكية المطبقة على رأس الوند

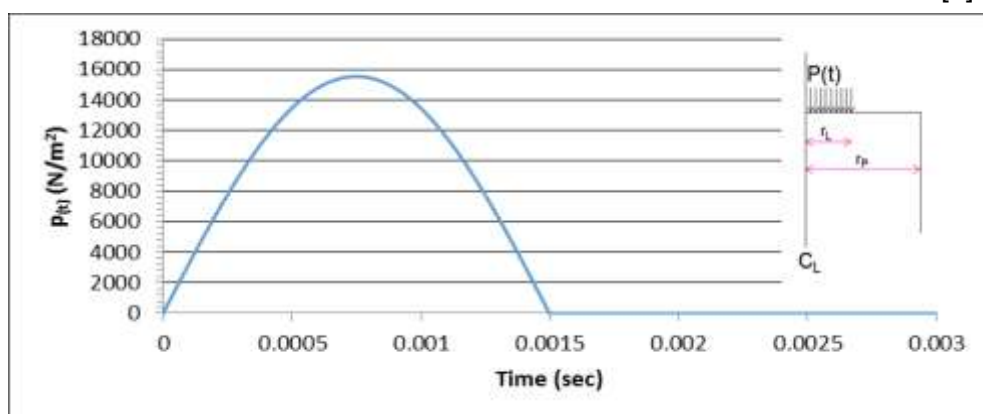
و بالتالي تعطى شدة الحمولة الديناميكية كتابع للزمن كما يلي :

$$p(t) = p_0 \sin \omega t \quad 0 \leq t \leq T_d \quad (7)$$

$$p(t) = 0 \quad t > T_d$$

$$\omega = \pi/T_d \quad (8)$$

حيث: P_0 تمثل مطال الحمولة الديناميكية وهي قيمة صغيرة نسبياً لابقاء الدراسة في المجال المرن وتتراوح قيمتها حسب الدراسات التجريبية (10000-20000 N/m²) (8). اعتماداً على ما تقدم قمنا في هذه الدراسة بتمثيل قوة الصدم بمخطط (حمولة-زمن) بشكل نصف موجة ضغط جيبيه مطالها 15000 N/m² وتؤثر خلال زمن قصير نسبياً يساوي 0.0015sec . تطبق هذه الحمولة على مساحة دائرية نصف قطرها r_L من رأس الوند الذي نصف قطره r_p كما في الشكل [5] .



الشكل [5]: مخطط (حمولة - زمن) للحمولة النبضية المطبقة على رأس الوند ومكان تطبيق الحمولة

2 التقسيم بطريقة العناصر المنتهية:

إن التقسيم بطريقة العناصر المنتهية للعلاقات التي تحل مسألة التأثير المتبادل بين الوند المدروس والتربة يقود إلى جملة المعادلات التالية:

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

حيث: [M] هي مصفوفة الكتلة، [K] هي مصفوفة الصلابة و {F} هو شعاع القوى الخارجية المؤثرة في عقد شبكة العناصر المنتهية.

{u}, {\dot{u}}, {\ddot{u}} هي أشعة الانتقال والسرعة والتسارع الجزئية في عقد الشبكة.

قمنا بأخذ تخامد التربة بعين الاعتبار باستخدام صيغة التخامد للزج لريلييه (Rayleigh Viscous Damping) والتي يتم فيها تشكيل مصفوفة التخامد [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 α_M و α_K هي عوامل تعتمد على خواص

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

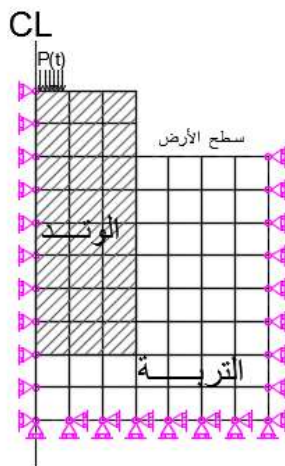
$$\xi_i = \frac{\alpha_M}{2\omega_i} + \frac{\alpha_K \omega_i}{2} \quad (11)$$

ξ_i : نسبة التخامد لنمط الاهتزاز رقم i وهي تختلف حسب طبيعة التربة وتطبيقاتها والوسط المحيط، وتتراوح

عادة بين (5-10%) في مسائل انتشار الأمواج المرنة (Elastic Waves) في التربة (10).

3 الشروط المستخدمة :

باعتبار أن الطاقة المحرصة في تجارب الصدم غير المخرب صغيرة نسبياً و أن التشوهات الناتجة عنها في التربة والوند صغيرة لذلك فقد تم الحساب باعتبار سلوك التربة خطي مرن (Linear Elastic) مع تخامد لزج نوع ريلييه، أما الوند البيتوني فسلوكه خطي مرن مع إهمال تخامد الأمواج ضمن مادة الوند وكذلك اعتبرنا الانتقال النسبي بين الوند والتربة المحيطة به معدوم. باستخدام حالة التناظر الدوراني للمسألة حول المحور الشاقولي المار من مركز الوند قمنا بتقسيم الوسط لعناصر محددة رباعية الأضلاع متناظرة محورياً (Axisymmetric Quadrilateral Finite Element) كما في الشكل [6]. من أجل تقادي تأثير الأمواج المنعكسة على حدود الموديل على نتائج الحساب، قمنا بإبعاد حدود الموديل بمقدار كافٍ عن المصدر الديناميكي (مكان الصدم) وذلك باختيار طول وعمق الموديل LXH كبيرين كفاية لتجنب ظاهرة تداخل الأمواج المنعكسة على حدود الموديل مع الأمواج المنتشرة ضمن النافذة الزمنية المعتبرة للحساب.



الشكل [6]: الموديل العددي التناظري الدوراني المستخدم في الدراسة

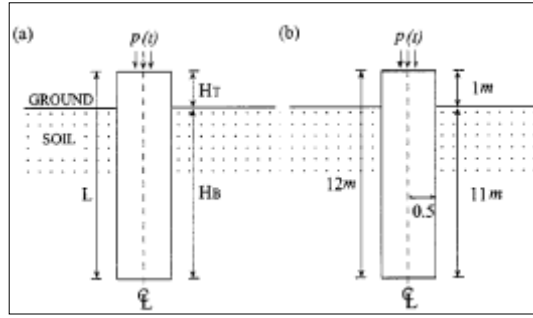
4 البارامترات المطلوبة للنمذجة:

- من أجل الحساب العددي يلزم تحديد البارامترات التالية وإدخالها في برنامج الحساب ABAQUS:
- خواص التربة : معامل يونغ E_s ، معامل بواسون μ_s ، نسبة التخماد ξ_s والكتلة الحجمية ρ_s .
- خواص الوتد: معامل يونغ E_c ، معامل بواسون μ_c ، الكتلة الحجمية ρ_c ، الطول الكلي للوتد L ، الطول المغروز في التربة H_B ، الطول الحر H_T ، نصف قطر الوتد r_p .
- حمولة الصدم: تعطى شدة الحمولة الديناميكية كتابع للزمن حسب العلاقة (7)
- بارامترات التقسيم الفراغي Δx والزمني Δt (11).

5 تحقيق الموديل

المعطيات الحقلية

قمنا بتحقيق الموديل على معطيات حقلية لتجربة صدم غير مخربة أجريت على وتد بيتوني ذي مقطع دائري قطره 1m ومساحة مقطعه $A_c=0.785 \text{ m}^2$ أبعاده محددة بالشكل [7] و مواصفات بيتون الوتد والتربة المحيطة به محددة بالجدول [1].



الشكل [7]: الوند المستخدم في الدراسة

الجدول [1]: مواصفات الوند البيتوني و التربة المحيطة بالوند بالإضافة لسرعة إنتشار الأمواج الإهتزازية في كل مادة

البيتون		التربة		الواحدة
E_C	3.31×10^{10}	E_S	1.8×10^8	N/m^2
ρ_C	2300	ρ_S	1925	Kg/m^3
ν_C	0.2	ν_S	0.4	
V_P	4000	V_P	450	m/s
V_S	2450	V_S	183	m/s

سرعة إنتشار الأمواج الإهتزازية الواردة في الجدول محسوبة استناداً الى العلاقات التالية (12):

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (12)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (13)$$

E : معامل يونغ (kPa) ، ν : معامل بواسون ، G : معامل القص (kPa) ، V_P : سرعة انتشار الموجة الضاغطة (m/sec) و V_S : سرعة انتشار الموجة القاصة (m/sec).

$P(t)$: تمثل الحمولة المطبقة على رأس الوند خلال فترة زمنية $T_d = 1.5 \times 10^{-3} s$

أقصى قيمة للضغط المطبق (peak pressure): $P_0 = 15000 N/m^2$.

نصف قطر تأثير الحمولة: $r_L = 0.0254 m$.

تم وضع الحساس (مستقبل الإشارة) على رأس الوند ذي المقطع الدائري في نقطة تبعد عن مركز الوند مسافة

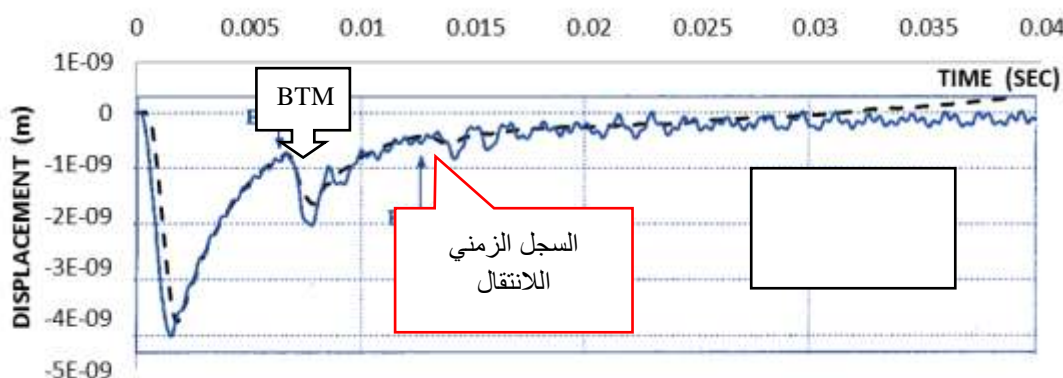
0.4m

تحليل المعطيات في برنامج (ABAQUS)

من أجل تحقيق الموديل العددي المقترح قمنا بإدخال مواصفات التربة والوند وقوة الصدم الحقلية في برنامج

الحساب (ABAQUS). وبعد حساب سرعة انتشار كل من أمواج الضغط والأمواج القاصة في كل من التربة والوند واعتماداً على معياري اختيار Δt و Δx اخترنا: $\Delta x = 0.05 m$ و $\Delta t = 0.00001 sec$. بإدخال هذه المعطيات وإجراء التحليل باستخدام البرنامج نحصل على السجل الزمني للمركبة الشاقولية للانتقال الجزيئي (U_2) في النقطة الواقعة على

رأس الوتد على مسافة من مركز الوتد مماثلة لمكان توضع الحساس في الإختبار الحقلي (13). يبين الشكل [8] مقارنة ما بين السجلين الزمنيين الحقلي والتجريبي والعددي الحسابي:



الشكل [8] مقارنة ما بين السجلين الزمنيين العددي والتجريبي للانتقال الشاقولي عند قمة الوتد السليم نلاحظ من الشكل وجود تقارب كبير بين المخططين، وبشكل خاص نلاحظ أن زمن وصول الموجة المنعكسة عن قدم الوتد في المخطط العددي المشار إليه بالعلامة (BTM) والذي قيمته حسب التحليل $T=0.00632$ sec هو مساوٍ لنظيره في المخطط التجريبي وبالتالي يمكن القول أن الموديل العددي المقترح محقق تجريبياً. حسابياً يمكن التحقق من صحة الموديل المستخدم باعتبار أن طول الوتد المستخدم $L=12$ m وكذلك سرعة انتشار موجة الإهتزاز ضمن مادة الوتد $V_{rod}=3790$ m/sec وبالتالي يكون الزمن اللازم لتقطع موجة الإهتزاز مسافة طول الوتد ذهاباً وإياباً تحسب بالعلاقة (2):

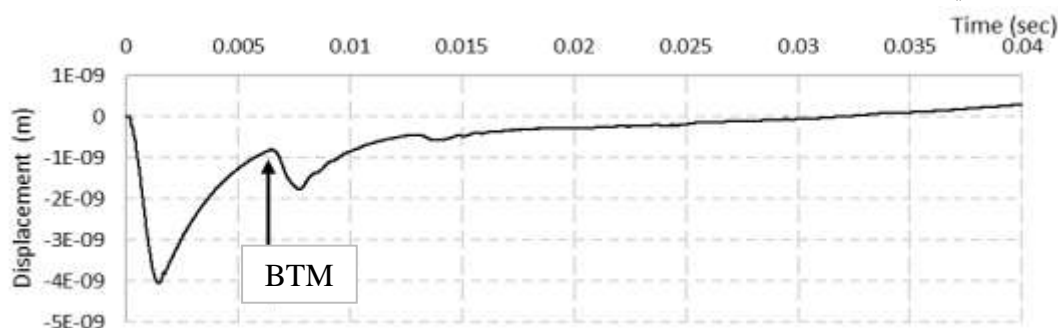
$$T_b=2L/V_{rod}=24/3790=6.3*10^{-3}sec$$

بالمقارنة مع الزمن الناتج من الموديل نجد أن الزمن هو نفسه تقريباً وبالتالي فإن الموديل المقترح قادر على نمذجة تجربة الصدم غير المخربة لوتد بيتوني مغروز في تربة متجانسة بشكل واقعي وبالتالي يكون استخدامه في دراستنا مبرراً علمياً.

1 - تحديد طول الوتد ومساحة مقطعه :

أولاً: بطريقة الاستخدام المباشر للسجلات الزمنية

بعد إجراء الحساب العددي نحصل على السجل الزمني للانتقال الشاقولي الممثل لاستجابة الوتد والمحسوب عند رأس الوتد والمبين في الشكل [9]:



الشكل [9]: الانتقال الشاقولي المحسوب عند قمة الوتد المدروس في النموذج العددي

من المنحني نقوم بتحديد زمن وصول أول موجة منعكسة عن أسفل الوتد $BTM=0.00632$ sec. زمن وصول الموجة المنعكسة هو الزمن الذي تقطع فيه موجة الإهتزاز مسافة مساوية ضعفي طول الوتد وبالتالي يحسب طول الوتد الكلي بالعلاقة (2):

$$L=0.5 \times 0.00632 \times 3790=11.976 \text{ m}$$

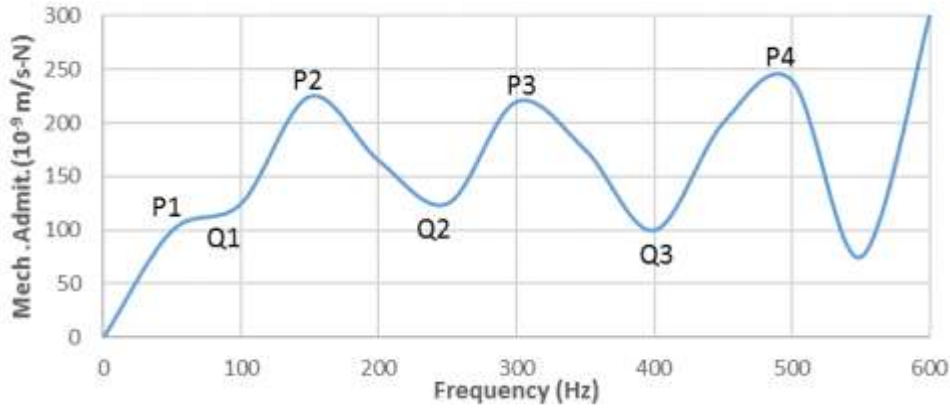
بالمقارنة مع الطول الفعلي للوتد ($L=12\text{m}$) نحسب الخطأ في تقدير طول الوتد:

$$ERORR= (12-11.976)/12=0.1966 \%$$

نلاحظ أن دقة الحساب كبيرة جداً ونسبة الخطأ مهملة تقريباً، وبالتالي يمكن القول أن طريقة التحليل المباشر للسجلات الزمنية يمكن استخدامها بسهولة لتقدير طول جزء الوتد السليم المغروز بالتربة ولإجراء الدراسة البارامترية.

ثانياً: باستخدام طريقة القابلية الميكانيكية

يبين الشكل [10] منحني الإستجابة الميكانيكية للوتد المدروس.



الشكل [10]: منحني القابلية الميكانيكية للوتد المدروس

يمكن حساب طول ومساحة مقطع الوتد اعتماداً على المنحني في الشكل [10] وباستخدام العلاقات (4)، (5) و (6) كما يلي:

$$R= (P_3 * Q_2)^{0.5}=0.153 * 10^{-6} \text{ m/s.N}$$

$$A_c=1/ (0.153 * 10^{-6} * 2300 * 3790) =0.749 \text{ m}^2$$

$$\text{Error per cent}= ((0.785-0.749)/0.785) * 100=4.58 \%$$

$$L=V_{rod}/ (f_{p4}- f_{p2}) =3790/ (318.2) =12.22\text{m}$$

$$\text{Error per cent}= (12.22-12)/12 * 100=1.833\%$$

نلاحظ أيضاً أن دقة الحساب كبيرة ونسبة الخطأ صغيرة.

نستنتج من مقارنة القيم الناتجة عن تطبيق الطريقتين أن كليهما تعطي نتائج مقبولة، مع الأخذ بعين الاعتبار أن طريقة التحليل المباشر للسجلات الزمنية أعطت دقة أكبر في تقدير طول الوتد بالإضافة إلى أن استخراج قيمة BTM أسهل من استخراج قيمتي P و Q في منحني القابلية الميكانيكية ولكنها لا تمكننا من حساب مساحة مقطع الوتد.

2 - الدراسة البارامترية

بعد تحقيق الموديل العددي قمنا باستخدامه لإجراء الدراسة العددية لتأثير كل من صلابة التربة المحيطة بالوتد وعمق غرز الوتد في التربة على دقة نتائج التحليل باستخدام طريقتي التحليل المعتمدتين.

المثال النموذجي المدروس:

ستتم الدراسة على المثال المستخدم لتحقيق الموديل مع الأخذ بعين الاعتبار المعطيات المبينة في الشكل [7] والجدول [1].

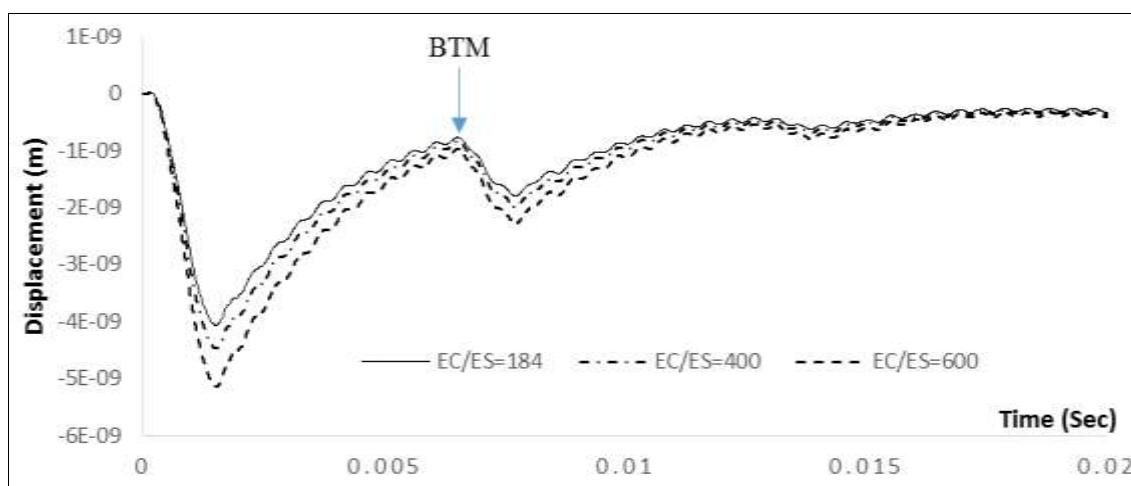
6-1 تأثير صلابة التربة المحيطة بالوتد (عامل الصلابة النسبي k_E):

لدراسة تأثير صلابة التربة المحيطة بالوتد ممثلة بمعامل يونغ E_S على دقة التحليل قمنا بإجراء الحساب العددي باستخدام برنامج ABAQUS من أجل ثلاث قيم (184, 400, 600) لعامل الصلابة النسبي ($k_E = E_C/E_S$) بحيث نقي قيمة عامل المرونة للوتد E_C ثابتة ونغير قيمة عامل المرونة للتربة E_S المحيطة بالوتد.

أولاً: في المجال الزمني:

يبين الشكل [11] السجل الزمني للانتقال الشاقولي الجزيئي المحسوب عند رأس الوتد في النموذج العددي

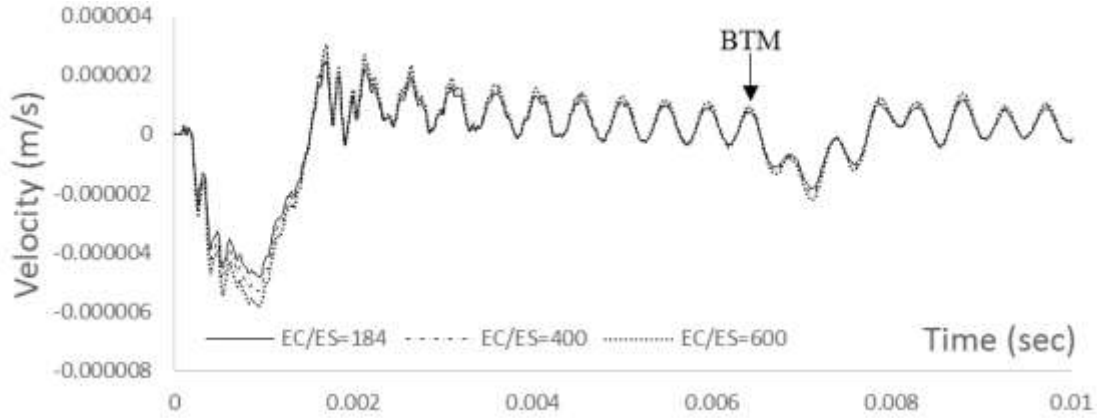
المدروس.



الشكل [11]: تأثير صلابة التربة المحيطة بالوتد على السجل الزمني للانتقال الشاقولي المحسوب عند قمة الوتد

نلاحظ من الشكل ما يلي:

- يتناقص مطال الانتقال الشاقولي للوتد (U_2) مع زيادة صلابة التربة المحيطة بالوتد
- إن زمن وصول الموجة المنعكسة عن قدم الوتد البييتوني والمشار إليها في المخطط بالعلامة (BTM) يبقى ثابتاً، وبالتالي يمكن القول أن دقة التحليل بالاستخدام المباشر للسجلات الزمنية لا تتأثر بصلابة التربة المحيطة بالوتد وهذا طبيعي لأن طريقة التحليل هذه تعتمد على الموجة الطولانية المنتشرة والمنعكسة في جسم الوتد فقط.
- نفس النتيجة نحصل عليها عند تحليل السجلات الزمنية للمركبة الشاقولية للسرعة الجزيئية (V_2) المحسوبة عند رأس الوتد بدلاً من الانتقال الشاقولي (U_2) كما هو مبين في الشكل [12].

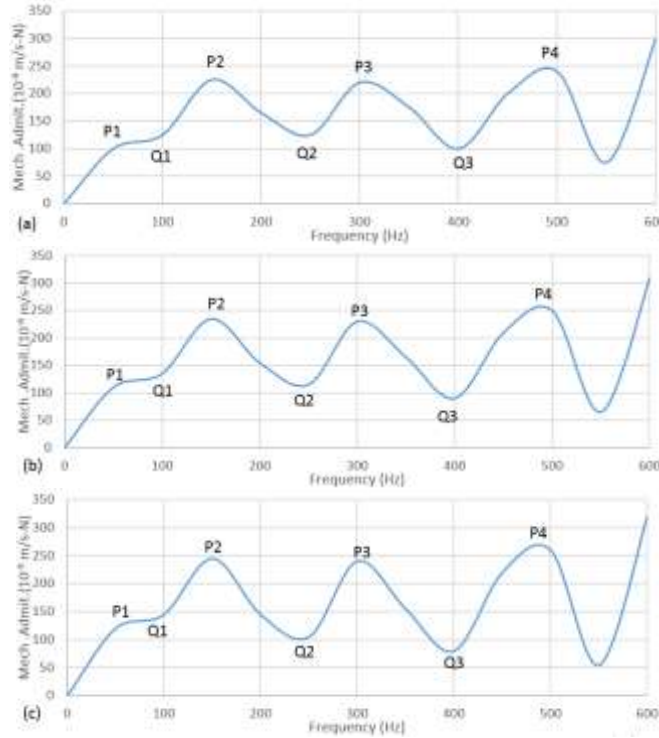


الشكل [12]: تأثير صلابة التربة المحيطة بالوتد على المركبة الشاقولية للسرعة الجزيئية المسجلة عند قمة الوتد

ثانياً: في المجال الترددي - طريقة القابلية الميكانيكية:

يبين الشكل [13] منحنيات القابلية الميكانيكية للوتد من أجل قيم متغيرة لعامل صلابة التربة المحيطة بالوتد وفق

مايلي: $k_E=184,400$ and 600 .



الشكل [13]: تأثير صلابة التربة المحيطة بالوتد على منحنى القابلية الميكانيكية للوتد:

$k_E=184$ (a) $k_E=400$ (b) $k_E=600$ (c)

باستخدام المنحنيات في الشكل [13] وباعتماد العلاقات (4)، (5) و (6) نحسب كل من طول الوتد ومساحة

مقطعه كما هو موضح في الجدول [2]. نلاحظ ما يلي:

- إن الخطأ في حساب طول الوتد يزداد مع نقصان صلابة التربة المحيطة بالوتد ولكنه يبقى صغيراً جداً (لا يتجاوز 1.6%) في كل الحالات.

- بشكل معاكس، إن الخطأ في حساب مساحة مقطع الوتد يزداد مع ازدياد صلابة التربة المحيطة بالوتد ويصل إلى قيم مهمة لا يمكن إغفالها (مثلاً 4.5% من أجل $k_E=184$). لكن إذا أخذنا بعين الاعتبار أن قيمة معامل

المرونة للتربة الموافق للقيمة $k_E=184$ هي (من الجدول [1]) $E_s=180\text{MPa}$ وبالتالي فالتربة صلبة جداً وهي حالة غير عملية لتنفيذ الأوتاد فيها يمكن القول أن نسبة الخطأ في حساب مساحة المقطع العرضي للوتد تبقى صغيرة نسبياً ومقبولة في جميع الحالات العملية.

الجدول [2]: تأثير تغير صلابة التربة المحيطة بالوتد على دقة حساب طول الوتد ومساحة مقطعه

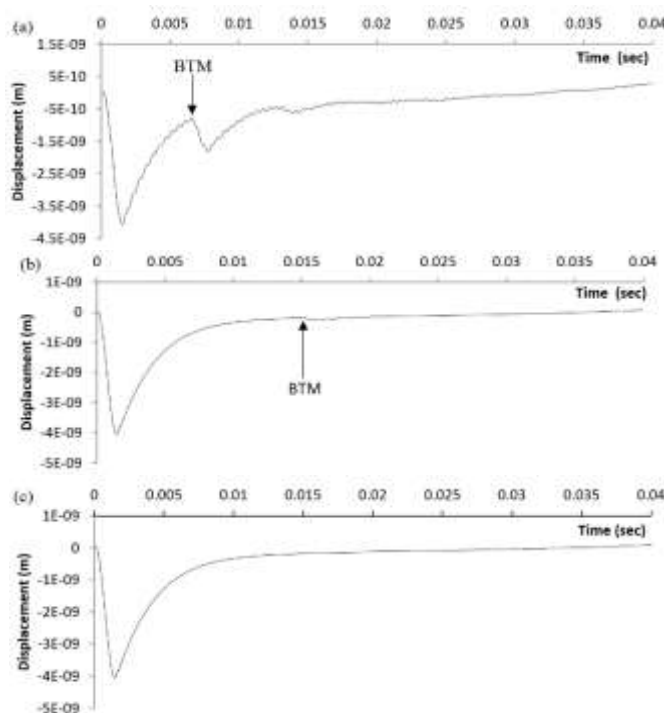
E_c/E_s	$2f = f_{p4} - f_{p2}\Delta$ (Hz)	$L = V_{rod}/(2\Delta f)$ (m)	ERROR (%)	$R = (Q_2 * P_3)^{0.5}$ (m/s N)	$A_c = (R * \rho_c * V_{rod})^{-1}$ (m ²)	ERROR (%)
184	318	11.90	0.75	$0.153 * 10^{-6}$	0.749	4.58
400	319	11.88	1	$0.151 * 10^{-6}$	0.759	3.31
600	321	11.8	1.6	$0.148 * 10^{-6}$	0.775	1.27

2-6 تأثير عمق غرز الوتد في التربة:

لدراسة تأثير عمق غرز الوتد في التربة نستخدم الموديل السابق الذكر لإجراء التحليل العددي باستخدام برنامج ABAQUS من أجل ثلاث قيم (12, 28, 44) لمعامل غرز الوتد (L/D) علماً أن مساحة مقطع الوتد ثابتة (قطره $D=1\text{m}$) وطول الجزء البارز من الوتد فوق التربة ثابت ($H_T=1\text{m}$) والمتغير فقط هو عمق غرز الوتد في التربة (H_B) وفق ما يلي $L/D=12, 28$ and 44 (حيث L تمثل الطول الكلي للوتد).

أولاً: في المجال الزمني:

يبين الشكل [14] السجلات الزمنية للإنتقال الشاقولي U_2 المحسوب عند قمة الوتد في الحالات الثلاثة.



الشكل [14]: تأثير عمق غرز الوتد في التربة على السجل الزمني للإنتقال الشاقولي المحسوب عند رأسه:

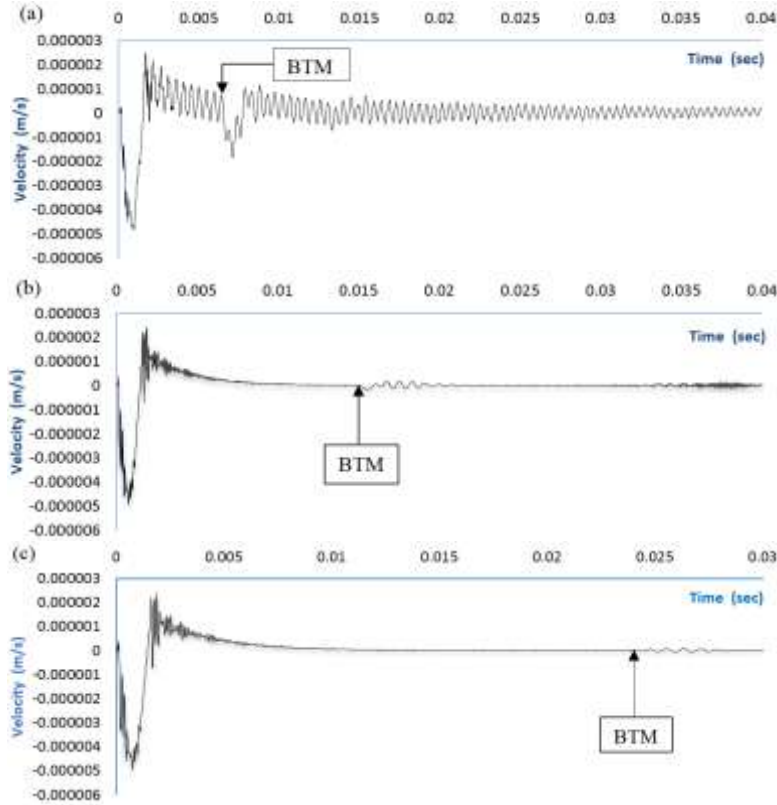
$L/D=44$ (c)

$L/D=28$ (b)

$L/D=12$ (a)

نلاحظ من الشكل أن هناك صعوبة في تحديد زمن وصول الموجة المنعكسة عن أسفل الوتد المحدد بالعلامة (BTM) مع ازدياد عمق الغرز حتى أن تحديد BTM يصبح متعذراً في حالة الأوتاد ذات عمق غرز كبير $L/D=44$ كما هو واضح في الشكل [14-c].

إذا استعصنا عن تحليل سجلات الانتقال بتحليل سجلات السرعة، يبين الشكل [15] السجلات الزمنية للمركبة الشاقولية للسرعة الجزئية V_2 المحسوبة عند رأس الوتد.



الشكل [15]: تأثير عمق غرز الوتد في التربة على السجل الزمني للسرعة الجزئية الشاقولية المحسوبة عند رأسه:

$L/D=44$ (c)

$L/D=28$ (b)

$L/D=12$ (a)

نلاحظ أنه في حالة تحليل السجل الزمني للسرعة الجزئية الشاقولية تبقى هناك صعوبة في تحديد زمن الوصول BTM. تزداد هذه الصعوبة مع ازدياد عمق الغرز ولكنها تبقى أقل من نظيرتها في حالة تحليل السجل الزمني للانتقال الشاقولي وخاصة من أجل القيم الكبيرة لعمق غرز الوتد ($L/D > 28$) ولذلك يفضل في هذه الحالة تحليل السجلات الزمنية للسرعة الجزئية لأنها الأكثر وضوحاً.

يبين الجدول [3] حساب طول الوتد استناداً إلى زمن وصول الموجة المنعكسة عن أسفل الوتد والمحددة على المخططات السابقة بالعلامة (BTM) وذلك باستخدام السجلات الزمنية للسرعة الجزئية لأنها الأكثر وضوحاً:

الجدول [3]: تأثير عمق غرز الوتد على دقة حساب طول الوتد باستخدام طريقة التحليل المباشر للسجلات الزمنية للسرعة الجزئية

الخطأ في الحساب	طول الوتد $L=0.5*V_{rod}*BTM$ (m)	زمن وصول الموجة المنعكسة (BTM) (sec)	عامل الغرز (L/D)
0.196%	11.976	0.00632	12
1.517%	28.425	0.015	28
5.086%	46.238	0.0244	44

بدراسة النتائج في الجدول [3] نلاحظ أن الخطأ في حساب طول الوتد يزداد مع ازدياد عمق غرز في التربة

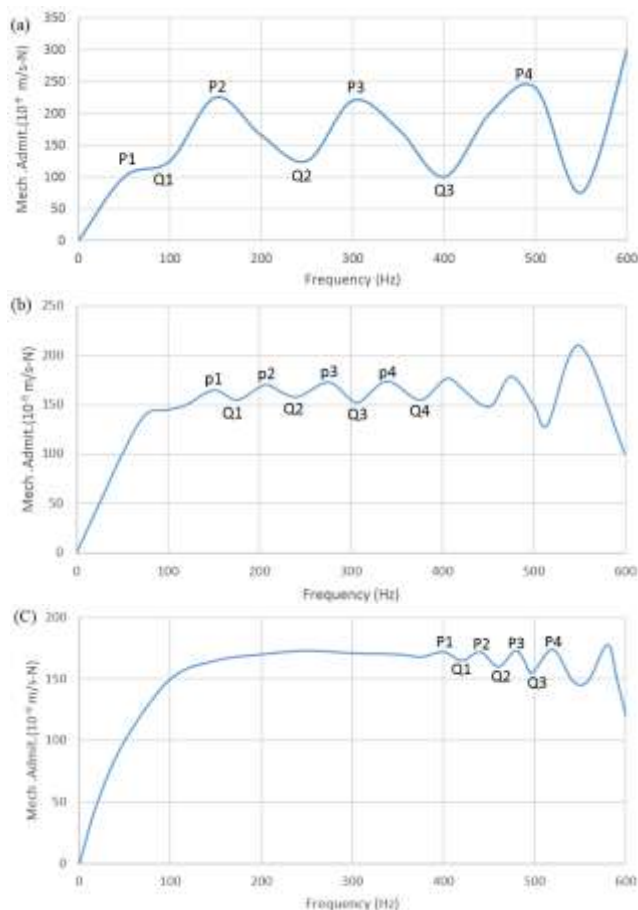
ليصل إلى قيمة كبيرة نسبياً (5%) من أجل قيمة عامل غرز $L/D=44$.

ثانياً: في المجال الترددي - طريقة القابلية الميكانيكية:

يبين الشكل [16] منحنيات القابلية الميكانيكية للوتد من أجل ثلاث قيم لمعامل غرز الوتد في التربة

($L/D=12, 28, 44$). من الملاحظ أن الإشارة تصبح قليلة الوضوح من أجل عامل غرز $L/D=44$ ولكن يمكن

استخراج البارامترات اللازمة لحساب طول الوتد ومساحة مقطعه كما سنرى لاحقاً.



الشكل [16]: تأثير عامل غرز الوتد (L/D) على منحنى القابلية الميكانيكية للوتد:

(a) $L/D = 12$ (b) $L/D = 28$ (c) $L/D = 44$

باستخدام المنحنيات في الشكل [16] و باعتماد العلاقات (4)، (5) و (6) نحسب كل من طول الوتد ومساحة

مقطعه كما هو موضح في الجدول [4]. نلاحظ ما يلي:

- يزداد الخطأ في حساب طول الوتد بوضوح مع ازدياد عمق غرز الوتد في التربة حتى يصل إلى قيم كبيرة غير مقبولة (مثلاً 6% تقريباً من أجل وتد طويل مع معامل غرز $L/D > 44$). يمكن تفسير ذلك بحصول تبديد كبير لطاقة الموجة الناتجة عن الصدم جسم الوتد الطويل وفي التربة المحيطة به (14).
- يتناقص الخطأ في حساب مساحة مقطع الوتد مع ازدياد عمق الغرز.

الجدول [4]: تأثير عمق غرز الوتد على دقة حساب طول الوتد ومساحة مقطعه باستخدام طريقة القابلية الميكانيكية

L/D	$2\Delta f = f_{p4} - f_{p2}$ (Hz)	$L = V_{rod} / (2\Delta f)$ (m)	ERROR (%)	$R = (Q_2 * P_3)^{0.5}$ (m/s.N)	$A_C = (R * \rho_c * V_{rod})^{-1}$ (m ²)	ERROR (%)
12	318.2	11.91	0.75	$1.53 * 10^{-7}$	0.749	4.58
28	130.34	29.078	3.85	$1.407 * 10^{-7}$	0.815	3.85
44	81.368	46.578	5.86	$1.418 * 10^{-7}$	0.809	3.1

الاستنتاجات و التوصيات

تضمن هذا البحث دراسة عددية بطريقة العناصر المنتهية لأهم طرق تقييم سلامة الأوتاد التي تعتمد مبدأ الصدم غير المخرب على رأس الوتد، حيث تمت دراسة انتشار الموجة الاهتزازية في جسم وتد بيتوني سليم غير مشوه وتوصلنا إلى استنتاج منحنى الإستجابة الديناميكية للوتد لقوة الصدم المطبقة على رأسه والحصول على السجلات الزمنية للانتقال والسرعة الجزيئيين الممثلة لاستجابة الوتد السليم. تستخدم هذه السجلات لاحقاً كمخططات مرجعية يعتمد عليها في تقييم سلامة الأوتاد البيتونية المنفذة في التربة بعد تحميلها الفعلي أو تعرضها لقوى قص زلزالية وذلك بمقارنتها بالسجلات الحقلية وبالتالي يمكن اكتشاف وجود تشوه في جسم الوتد و تحديد نوع هذا التشوه. من أجل إجراء الدراسة قمنا بوضع موديل عددي أظهر تحقيقه على قياسات حقلية تقارباً كبيراً بين النتائج العددية والحقلية. بعد تحقيق الموديل قمنا باستخدامه لإجراء دراسة بارامترية لتحديد مدى تأثير صلابة التربة المحيطة بالوتد وعمق غرز الوتد في التربة، وقد توصلنا بنتيجة البحث إلى العديد من النتائج التي تم ذكرها في سياق البحث والتي يمكن تلخيص أهمها بالنقاط التالية:

- تحليل تجربة الصدم غير المخرب للأوتاد البيتونية في المجال الترددي (طريقة القابلية الميكانيكية) أكثر شمولية من التحليل في المجال الزمني (طريقة التحليل المباشر للسجلات الزمنية للاهتزاز) فهي تتيح تحديد كل من طول الوتد ومساحة مقطعه أما السجلات الزمنية فهي تمكنا فقط من تحديد طول الوتد السليم.
- تأثير صلابة التربة المحيطة بالوتد على دقة تحليل النتائج في الطريقتين ضئيل ويبقى مقبولاً من أجل مختلف القيم العملية لصلابة التربة التي تستخدم فيها الأوتاد.
- يؤثر طول الوتد الكلي وبالتالي عمق غرزه سلباً على وضوح السجلات الزمنية للانتقال والسرعة الجزيئيين حيث تزداد صعوبة تحديد قيمة BTM مع ازدياد طول الوتد. تكون هذه الصعوبة أكبر في حالة الانتقال الجزيئي لذلك ينصح بتحليل السجلات الزمنية للسرعة الجزيئية في حالة القيم الكبيرة لعمق غرز الوتد ($L/D > 28$).
- أظهرت الدراسة في المجال الترددي أن ازدياد عمق الغرز يؤثر سلباً على تقدير طول الوتد وإيجاباً على تقدير مساحة مقطع الوتد ولكن في الحالتين وجدنا أنه مع ازدياد عمق الغرز تزداد صعوبة استخراج البارامترات اللازمة للحساب وبالتالي يجب الانتباه إلى دقة التحليل في حالة الأوتاد الطويلة ($L/D > 28$).

المراجع:

1. Whitaker, T. *Structural integrity of piles*. Civil Eng. Vol. 33, 1974, 20-23.
2. Davis, A. G ; Dunn, C.S. *From theory to Field experience with the non-destructive vibration testing of piles*. Proc.Instn Civil Eng. Vol. 23, Part 2, 1974, 571-593.
3. Davis, A. G ; Robertson, S.A. *Vibration testing of piles*. Struct. Eng. Vol. 21, 1976, A7-A10.
4. Higgs, J. S. *Integrity testing of concrete piles by shock method*. Concrete. Vol. 45, 1979, 31-33.
5. Stain, R. T. *Integrity testing*. Civil Eng, London. Vol. 18, 1982, 53-59.
6. Stain, R. T. *Integrity testing*. Civil Eng, London. Vol. 18, 1982, 71-73.
7. Davis, A. G ; Dunn, C.S. *From theory to Field experience with the non-destructive vibration testing of piles*. Proc.Instn Civil Eng. Vol. 23, Part 2, 1974, 520-522.
8. Sansalone, M ; Carino, N. J. *Transient impact response of thick circular plates*. NBS J. Res. Vol. 18, 1987, 355-367.
9. Sansalone, M ; Carino, N. J. *A Finite element study of transient wave propagation in plates*. NBSJ. Res. Vol. 14, 1987, 267-278.
10. Sansalone, M ; Carino, N. J. *A Finite element study of the interaction of transient stress waves with planar flaws*. NBS J. Res. Vol. 56, 1987, 279-290.
11. Sansalone, M ; Carino, N. J. *A Finite element study of the interaction of transient stress waves with planar flaws*. NBS J. Res. Vol. 56, 1987, 267-278.
12. Lin, Y ; Sansalone, M. *Detecting flaws in concrete beams and columns*. ACI Mater. J. Vol. 146, 1992, 394-405.
13. Lin, Y ; Sansalone, M. *Detecting flaws in concrete beams and columns*. ACI Mater. J. Vol. 146, 1992, 885-893.
14. Schellingerhout, J. G. *Quantifying pile defects by integrity testing. Application of Stress-Wave Theory to Piles, Int. Conf. Balkema, Rotterdam*. Vol. 26, 1992, 319-324.