

Determination The Depth Of Improvement Using Dynamic Compaction On Sandy Soils

-Abstract-

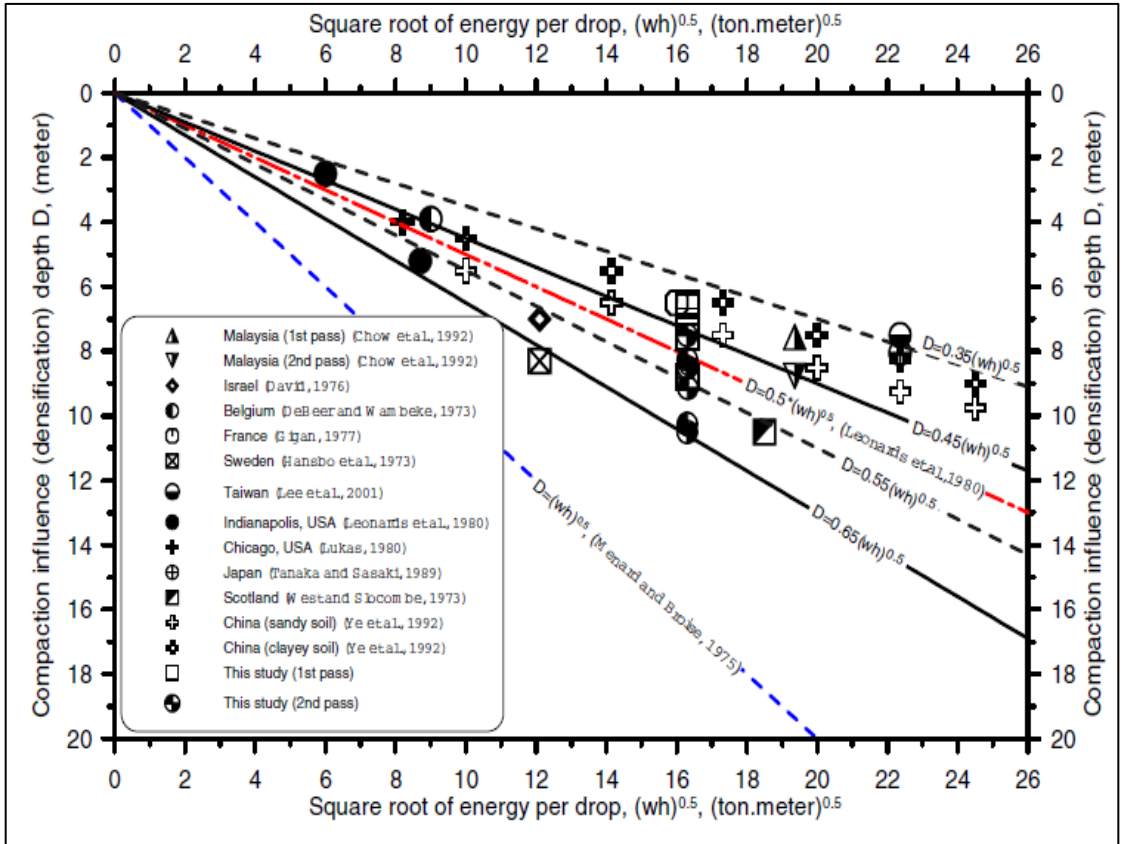
The dynamic compaction (DC) process by the method of falling weights is one of the most used techniques to improve sandy soils in particular, The problem of dynamic compaction is to determine its effectiveness before starting it on site to ensure the possibility of reaching the required level of compaction and depth of improvement using the only available compaction equipment.

In our research, we studied the dynamic compaction of dry sand soils numerically using the advanced calculation program by the finite element method ABAQUS, and we reached a numerical model that is relatively simple and effective at the same time with allows predicting the effectiveness of soil compaction of a specific site using specific compaction equipment and thus the optimal design of the dynamic compaction process.

Key words: Dynamic compaction, falling weight method, compaction efficiency, depth improvement, finite elements, ABAQUS.

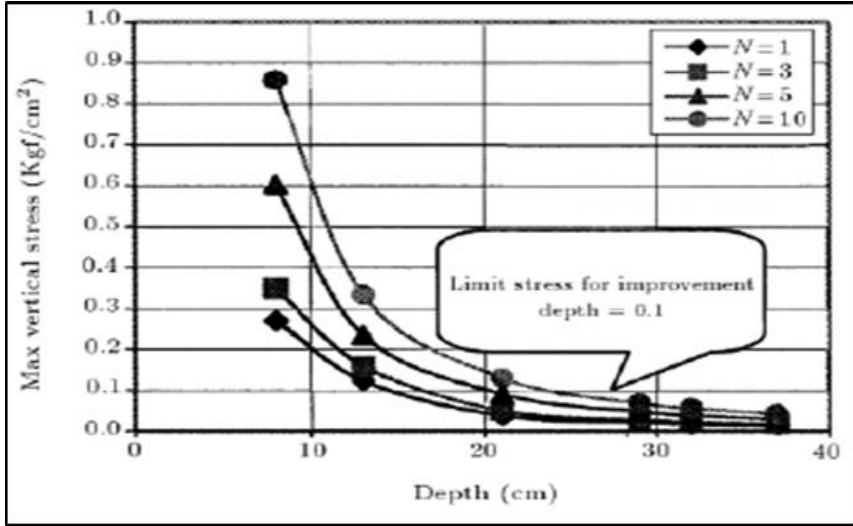
حيث: W كتلة الوزن الساقط مقدرة بـ ton، H ارتفاع السقوط مقدراً بـ m .

وجد الباحثون لاحقاً أن المعادلة السابقة تعطي قيمة أكبر من الواقع لعمق التحسين لذلك قاموا تعديلها بضربها بعامل $(n=0.3-0.8)$ عامل تجريبي قيمته أقل من 1 يأخذ بالحسبان العوامل الأخرى المؤثرة في عمق التحسين غير الوزن الساقط وارتفاع السقوط)، من جهة أخرى، يبين الشكل (1) العلاقة بين الجذر التربيعي لطاقة الرص في الدقة الواحدة و بين العمق الفعال للتحسين [12].



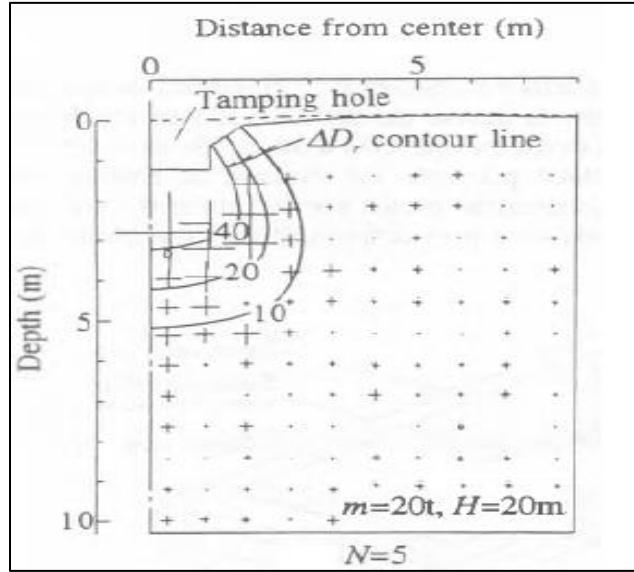
الشكل (1) العلاقة بين الجذر التربيعي لطاقة الرص في الدقة الواحدة و بين العمق الفعال للتحسين [12]

كما يمكن تحديد عمق التحسين D_{max} عن طريق تقدير طاقة الرص المتبددة مع العمق الشكل (2)، إن هذه الطاقة يمكن ربطها مع اجهاد الرص في كل نقطة حيث تم تسجيل سجل إجهاد-زمن على أعماق مختلفة ومن أجل دقائق مختلفة. ومن ثم حساب قيمة المطال وبالتالي تحديد عمق التحسين [6]



الشكل (2) تغير قيمة إجهاد الرص الشاقولي الأعظمي مع العمق [6]

وفي دراسة تجريبية هامة لتحديد فعالية الرص الديناميكي قام باحثون بتمثيل عملية الرص بطريقة الطرد المركزي [8]، حيث وجدوا أنه عند اسقاط وزن $w=20\text{ton}$ مساحة مسقطة 4.5m^2 من ارتفاع $H=20\text{m}$ (حيث تم تصحيح ارتفاع السقوط في تجربة الطرد المركزي لكي يكون له نفس السرعة كما في حقل جاذبية $1g$) على سطح التربة وذلك بعد خمس دقائق متتالية $N=5$ ، تزداد الكثافة النسبية بمقدار $10-20-40\%$ في الأعماق $5.2-4.2-3.2\text{m}$ على الترتيب كما هو موضح في الشكل (3)

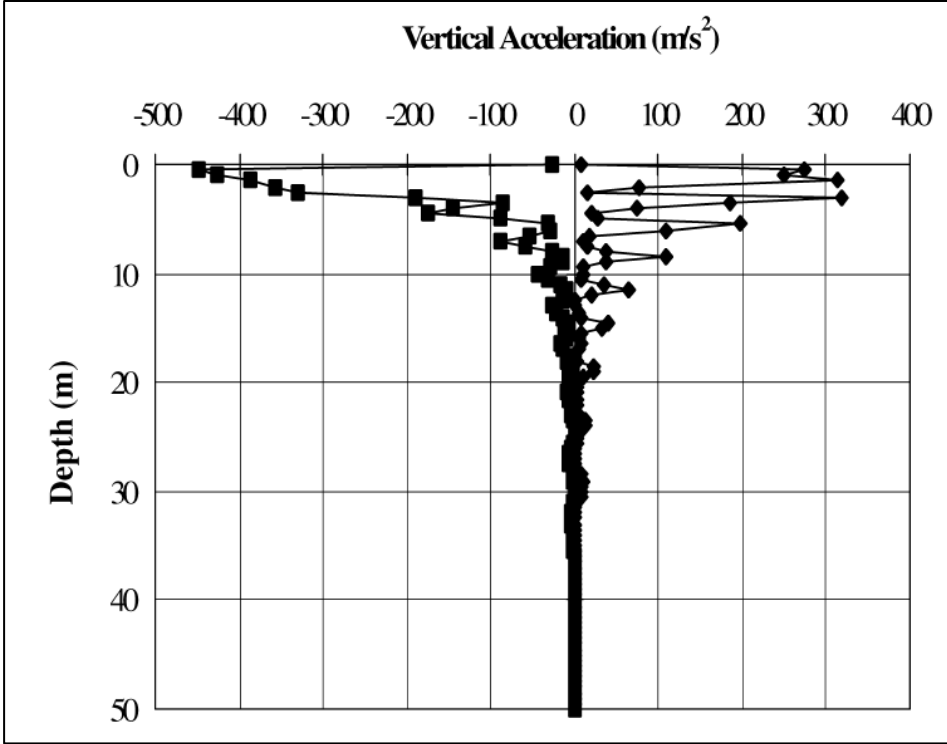


الشكل(3) خطوط الكنتور لتزايد الكثافة النسبية [8]

وقد أوصى الباحثون في هذه الدراسة إلى أن عمق الرص هو العمق الذي تزداد فيه الكثافة النسبية للتربة المدروسة بمقدار 10% [8].

إن الطرق العددية تعتبر من أفضل الطرق لدراسة وتحليل عملية الرص الديناميكي بشكل دقيق و تفيد في التنبؤ بفعاليتها قبل البدء بتنفيذه حقلياً.

من أجل تقدير عمق التحسين بالطرق العددية فقد اقترح بعض الباحثين أن عمق التحسين بالرص هو العمق الذي يكون فيه التسارع الجزيئي الأعظمي مساوياً 2g كما هو موضح في الشكل(4) [9].

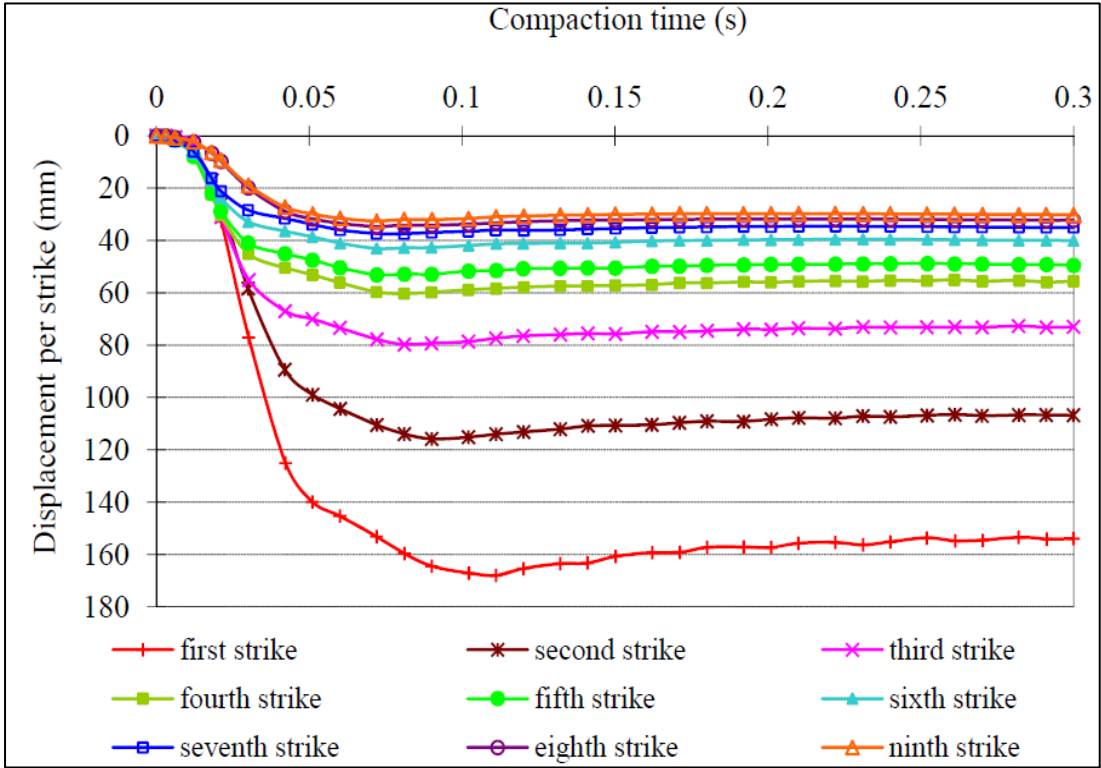


الشكل (4) التسارع الجزيئي الأعظمي مع العمق في مركز الوزن الساقط [9]

تجدر الإشارة إلى أن الباحثين في هذه الدراسة يفضلون استخدام معيار Mohr Coulomb بدلاً من معيار Drucker–Page، (يفترض معيار Mohr Coulomb بالمقارنة مع Drucker Page أن الانهيار (Failure) مستقل عن قيمة الإجهاد الرئيسي الوسطي (Intermediate Principal Stress) ، والذي يعتبر مناسباً لمعظم التطبيقات على الرغم من أن معظم المواد الجيوتكنيكية تتمتع بدرجة معينة من الاعتماد على الإجهاد الرئيسي الوسطي.) [9]

وفي دراسة عديدة أخرى أجريت على تأثير الرص الديناميكي في ردمية ترابية خواصها $E=22.9MPa, \rho=28.2o, \nu=0.30, c=5KPa, \rho=1800Kg/m^3$ وبتطبيق تسع دقائق وجد أن الهبوط الناتج عن عملية الرص يكتمل بعد 1sec ويصل إلى قيمة ثابتة عند 0.25sec [10]، يوضح الشكل (5) تغير الانتقال الشاقولي مع الزمن الناتج عن

رص التربة بعدة دقائق متتالية حيث نلاحظ إن الدقة الأولى تنتج انتقالاً شاقولياً (هبوطاً) أعظماً مقداره 168mm عند 0.09sec وتصل لقيمة ثابتة 156mm عند 0.25sec حيث تقل القيمة بمقدار 12mm والتي هي أقل بكثير من القيمة النهائية 156. كما وجد أن الهبوطات تنتج بشكل أساسي عن الدقات الثلاث الأولى، وذلك مقارنة بالدقات (4-9). سنستفيد من هذه الدراسة أنه عند نمذجة الرص الديناميكي عددياً يمكن الاكتفاء بثلاث دقائق متتالية لأن زيادة الهبوط تصبح صغيرة جداً ويمكن إهمالها، كما يمكن اعتبار الزمن الفاصل بين كل دقتين متتاليتين [1-0.25]sec .



الشكل (5) منحنيات تغير الانتقال الشاقولي مع الزمن الناتجة عن رص التربة بعدة دقائق متتالية [10]

العددي لإجراء دراسة بارامترية لأهم العوامل المؤثرة على فعالية الرص الديناميكي للترب الرملية والتي تتضمن كل من كتلة الوزن الساقط وقطره وارتفاع السقوط

الموديل العددي:

تمت النمذجة باعتبار حالة التناظر الدوراني بالنسبة للمحور الشاقولي المار من مركز ثقل الوزن الساقط على سطح التربة حيث تعتبر التربة جسماً مرناً-لدناً يخضع لتشوهات كبيرة وتسلق سلوك مور-كولومب Mohr-Coulomb الذي يعبر عنه ببارامترات التربة تماسك التربة c ، زاوية الاحتكاك الداخلي ρ ، معامل المرونة E ، معامل بواسون ν وتخاذم التربة لزج نوع ريليه يعبر عنه بنسبة التخاذم ξ .

يتم صدم جسم التربة بوزن ساقط هو عبارة عن كتلة بيتونية كتلتها (W) مقدرة بالطن ذات مقطع دائري نصف قطرها r_0 تسقط من ارتفاع (H) يعتمد الموديل العددي على نمذجة قوة الرص والتربة عن طريق برنامج ABAQUS.

نمذجة قوة الرص:

إن الدراسة العددية للرص الديناميكي للتربة بطريقة الوزن الساقط تستلزم أولاً نمذجة قوة الرص المطبقة على سطح التربة، والتي تعرف بأنها القوة الديناميكية المطبقة في نقطة الرص الناتجة من سقوط البلاطة على سطح الأرض. وجد نتيجة قياسات حقلية متعددة أن الحمولة الديناميكية الناتجة عن سقوط الوزن على سطح التربة المراد رصها يمكن تمثيلها بتابع تحميل (قوة-زمن) بشكل نصف موجة جيبيية متخامدة (Damped Half Sine Wave) تؤثر خلال زمن قصير جداً (حوالي 0.05sec) [10] حيث وجد أنها تعطي قيماً قريبة من البيانات الحقلية المتوفرة من عمليات الرص الديناميكي كما هو موضح الشكل (6)، عند تمثيل عدة دقائق متتالية تم اختيار الدقة الواحدة بشكل موجة نصف جيبيية متخامدة تؤثر في جسم التربة المدروس بزمن قدره 0.05sec ويحيث يكون الزمن الفاصل بين كل دقتين متتاليتين 0.25sec وهي فترة زمنية كافية للتربة بأن يستقر فيها الهبوط [10].

اعتماداً على ما تقدم قمنا في دراستنا بتمثيل قوة الرص الديناميكي بمخطط (قوة - زمن) بشكل نصف موجة جيبيية تؤثر خلال زمن قصير يساوي 0.05sec ومطالها محسوب من العلاقة (3) كما هو موضح في الشكل (6).

التقسيم بطريقة العناصر المنتهية

إن التقسيم بطريقة العناصر المنتهية للعلاقات التي تحل مسألة التأثير المتبادل بين التربة والوزن الساقط يقود إلى جملة المعادلات الآتية:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (4)$$

حيث:

[M] , [C] , [K] : مصفوفة الكتلة، التخماد، الصلابة على الترتيب.

{F}: شعاع القوى الخارجية المؤثرة على شبكة العناصر المنتهية .

{u}, {u'}, {u''}: أشعة الانتقال والسرعة والتسارع في نقاط الشبكة .

يؤخذ تخامد التربة بعين الاعتبار باستخدام صيغة التخماد اللزج لريليه

(Rayleigh Viscous Damping) والتي يتم فيها تشكيل مصفوفة التخماد [c] بشكل

مركب من كل مصفوفة الصلابة [K] والكتلة [M] وفق الصيغة الآتية [4]:

$$[C] = a_M [M] + a_k [k] \quad (5)$$

حيث: a_M, a_k : عوامل تعتمد على خواص تخامد المادة .

يقود تركيب مصفوفة التخماد بهذا الشكل إلى تمثيل التخماد بنسبة التخماد ξ

(Damping Ratio) والتي هي مجموع حدين، الأول يتناسب طردياً مع التواتر

الزاوي (Angular Frequency) ω وللتهزاز ω والثاني يتناسب عكساً معه حسب العلاقة:

معييار التقسيم الزمني

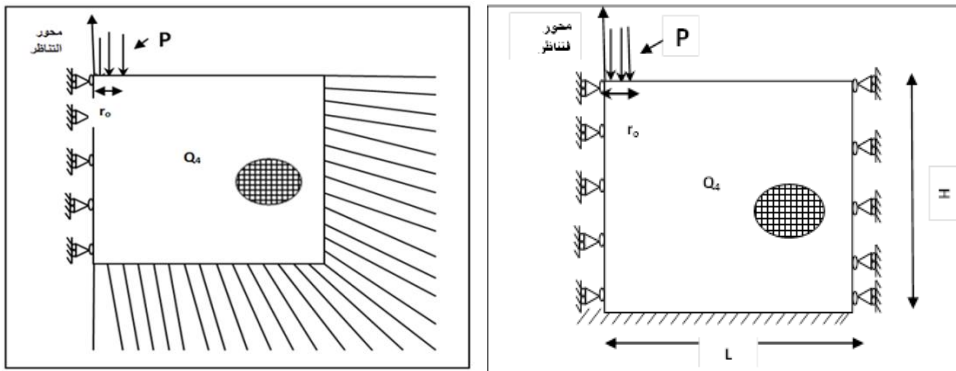
يجب اختيار الخطوة الزمنية للحساب Δt بعناية من أجل ضمان دقة الحل. أعطى [13] العلاقة العملية الآتية لحساب Δt :

$$\frac{\Delta x}{C_p} \frac{1}{10} \leq \Delta t \leq \frac{\Delta x}{C_p} \quad (8)$$

C_p : تمثل سرعة انتشار الموجة الأسرع (موجة الضغط P).

الشروط المستخدمة:

تم الحساب باعتبار سلوك التربة مرن لدن يتبع قانون سلوك مور- كولومب مع تخامد لزج نوع ريليه وتم تقسيم التربة في الموديل لشبكة من العناصر المنتهية الرباعية المتناظرة Q4. باعتبار أن الأمواج الناتجة عن عملية الرص والمنتشرة في التربة من أنواع مختلفة وذات أطوال مختلفة فلتجنب تداخل الأمواج المعتبرة تم استخدام العناصر غير المنتهية لتفادي تداخل الأمواج المنعكسة على حدود الموديل مع الأمواج المنتشرة ضمن النافذة الزمنية للحساب، وتم الحساب باعتبار حالة التناظر الدوراني حول المحور الشاقولي المار من مركز الوزن الساقط .



الشكل (7) الموديل العددي المستخدم

البارامترات المطلوبة للنمذجة:

من أجل الحساب العددي يلزم تحديد البارامترات الآتية وإدخالها في برنامج الحساب
:ABAQUS

- خواص التربة: معامل يونغ E ، معامل بواسون μ ، نسبة التخماد ξ والكتلة الحجمية ρ ، التماسك c ، زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة ϕ .
- خواص الوزن الساقط: الكتلة W ، نصف القطر r_0 ، ارتفاع السقوط H (نستنتج منها تابع التحميل الديناميكي المطبق على سطح التربة).
- بارامترات التقسيم الفراغي والزمني.

تحقيق الموديل العددي:

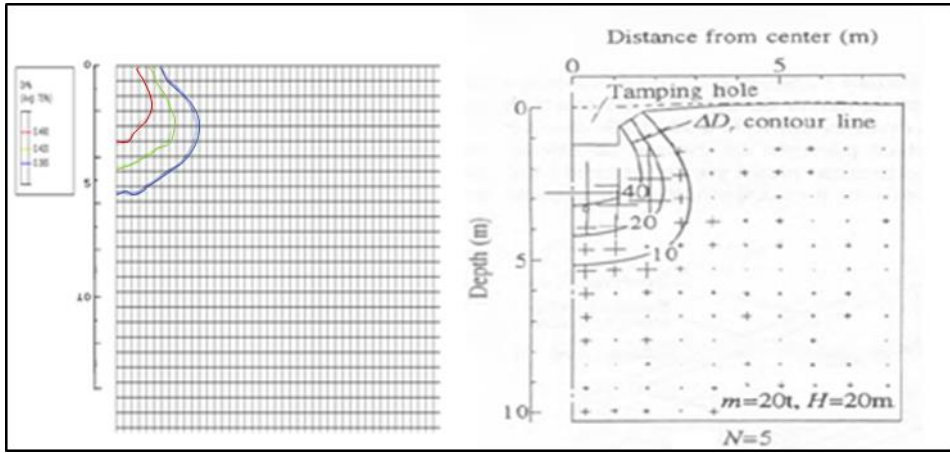
قمنا في بحثنا بتحقيق الموديل العددي المقترح على نتائج قياسات تجريبية للرص الديناميكي حصلنا عليها نتيجة البحث المرجعي [10]. حيث أجرى الباحثون دراستهم على تربة رملية خواصها: معامل يونغ $E = 25MPa$ ، معامل بواسون $\mu = 0.25$ ، نسبة التخماد $\xi = 5\%$ والكتلة الحجمية $\rho = 1.57 \text{ ton/m}^3$ وزاوية الاحتكاك الداخلي $\phi = 25^\circ$ والكثافة النسبية الأولية للتربة $\Delta D_r = 35\%$

وقد تم صدم جسم التربة بوزن ساقط هو عبارة عن كتلة بيتونية ($W=20\text{ton}$) ذو مقطع دائري مساحة مقطعه 4m^2 يسقط من ارتفاع ($H=20\text{m}$)

ومن أجل تحديد فعالية الرص الديناميكي تم قياس تزايد الكثافة النسبية الناتجة عن الرص بمقدار 10-20-40% ووجد أن هذه الزيادة تحدث عند الأعماق التالية على الترتيب $(3.2-4.2-5.2)\text{m}$ ، وخلص الباحثون أن عمق الرص هو العمق الذي تصل فيه الزيادة في قيمة الكثافة النسبية للتربة المدروسة بمقدار 10%. كما بلغ التحسين الجانبي الناتج عن عملية الرص 2.9m .

اعتمدنا في بحثنا هذا طريقة العناصر المنتهية لنمذجة مسألة فعالية الرص الديناميكي

حيث قمنا بأخذ كتلة من التربة ذات مواصفات مماثلة لمواصفات التربة الرملية المذكورة في الدراسة المرجعية ومعرضة لنفس قوة الصدم، وباعتبار أن مخرجات البرنامج لا توفر قيم الكثافة النسبية، قمنا باستنتاج خطوط الكنتور الممثلة لزيادة الكثافة النسبية بمقدار % 10-20-40 تحت تأثير الوزن الساقط لمعايرة النتائج العددية مع تلك التي حصلنا عليها من الدراسة المرجعية.



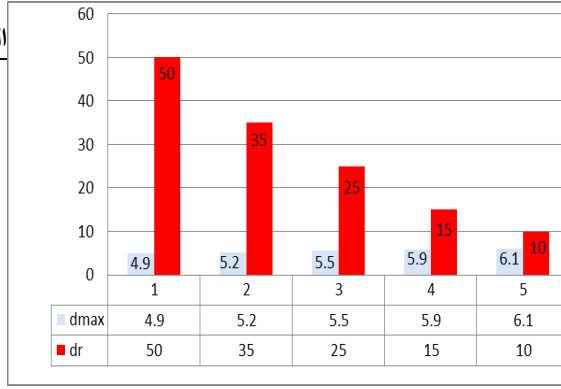
(b) الطريقة العددية

(a) الطريقة التجريبية

الشكل (8) مقارنة بين فعالية الرص الديناميكي بالطريقة التجريبية و العددية.

نلاحظ وجود تقارب جيد جداً ما بين النتائج العددية باستخدام برنامج ABAQUS والنتائج التي تم الحصول عليها بالدراسة المرجعية. حيث أن الكثافة النسبية تزداد بمقدار % 10-20-40 عند الأعماق m (3.2-4.2-5.2) على المحور الشاقولي المار من محور الوزن الساقط حسب [8] بينما حسب الدراسة العددية المقترحة فتكون هذه الزيادة عند الأعماق m (3.3-4.2-5.4) على الترتيب.

كما نلاحظ وجود تقارب بين الدراسة التجريبية والعددية للمنطقة المرتصة حيث أن التحسين الجانبي حسب البحث المرجعي 2.9m في حين بلغ في الدراسة العددية المقترحة 3m.



الشكل (9) العلاقة بين زيادة الكثافة النسبية و عمق التحسين بالرص الديناميكي لها.

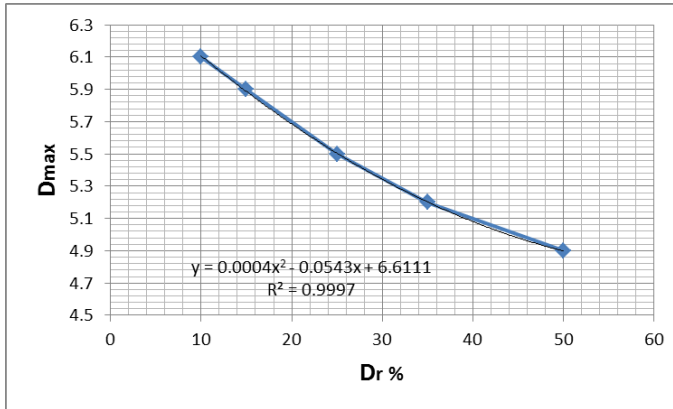
نلاحظ من الشكل أنه من أجل تربة ذات كثافة نسبية أولية 50% كان عمق التحسين الأعظمي 4.9m أما من أجل كثافة نسبية أولية 10% يكون عمق التحسين الأعظمي الناتج 6.1m .

أي أنه من أجل نفس معدات الرص المستخدمة وارتفاع السقوط يتناقص عمق التحسين الناتج مع زيادة الكثافة النسبية الأولية للتربة بسبب قلة الفراغات الموجودة في التربة.

يمكن القول إن عمق التحسين للترب المخلطة يكون أكبر منه للترب متوسطة الارتصاص. كما نجد أن الرص الديناميكي فعال حتى للترب المتوسطة الارتصاص $D_r=50\%$ حيث نصل إلى عمق تحسين فعال يساوي 4.9m تحت الوزن الساقط.

يمثل الشكل (10) العلاقة بين الكثافة النسبية D_r للتربة بعد عملية الرص وعمق

التحسين الناتج .



الشكل (10) العلاقة بين زيادة الكثافة النسبية و عمق التحسين.

نلاحظ من الشكل أنه كلما زادت الكثافة النسبية الأولية للتربة الرملية (زيادة ارتصاص التربة) يقل عمق التحسين الناتج، كما أن شكل العلاقة بينهما كثير حدود.

ثانياً-تأثير كتلة الوزن الساقط وارتفاع السقوط على فعالية الرص:

من أجل دراسة تأثير كل من كتلة الوزن الساقط W وارتفاع السقوط H على عمق التحسين بالرص الديناميكي قمنا بحساب عمق التحسين المتوقع لكل نوع من الترب حسب كثافته النسبية الأولية D_{r0} ، مع تغيير قيم كل من كتلة الوزن الساقط وارتفاع السقوط.

يوضح الجدول (1) الحالات المدروسة من أجل مختلف حالات الكثافة النسبية للتربة الرملية:

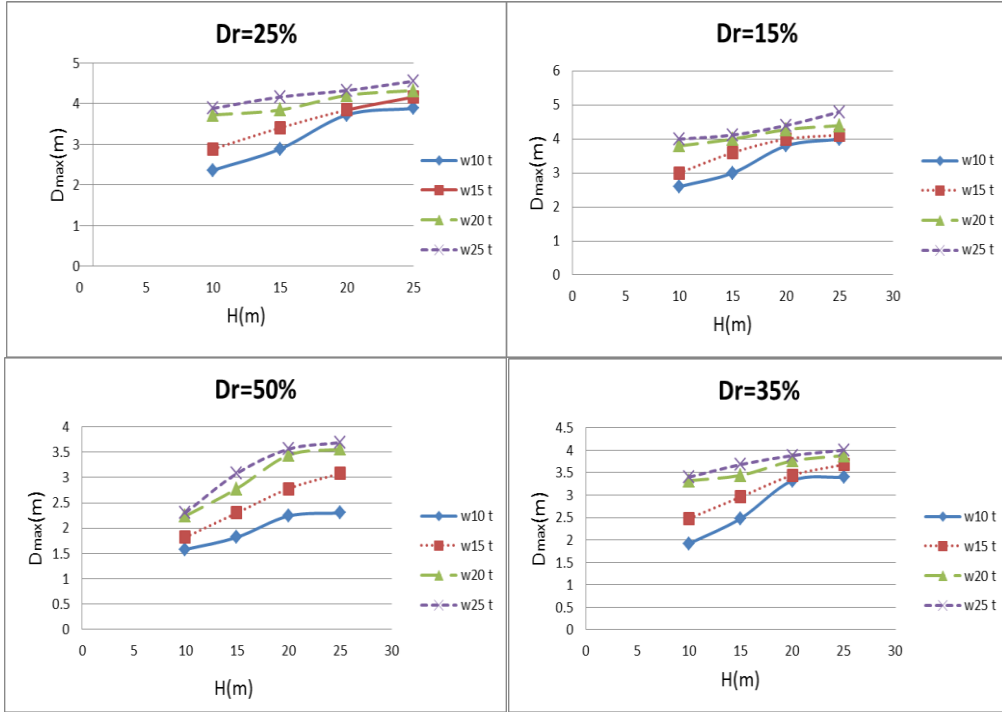
W(t)	10				15				20				25			
H(m)	10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20	25

الجدول (1) كتل الوزن الساقط وارتفاع السقوط المدروسين في الدراسة البارامترية

تم حساب عمق التحسين من أجل كتلة ثابتة W وتغيير ارتفاع السقوط من أجل أربعة قيم مختلفة كما هو موضح في الجدول (1)، وذلك من أجل ثلاث حالات مختلفة للتربة الرملية:

- تربة رملية مخلخلة جداً
- تربة رملية مخلخلة
- تربة رملية متوسطة الارتصاص

يبين الشكل (11) تغيير عمق التحسين الناتج عن عملية الرص الديناميكي مع تغيير كل من W, H .



الشكل (11) تأثير كل من ارتفاع السقوط وكتلة الوزن الساقط على عمق التحسين بالرص الديناميكي وذلك من أجل قيم مختلفة للكثافة النسبية الأولية للتربة الرملية.

نلاحظ أن شكل العلاقة بين كل من ارتفاع السقوط وكتلة الوزن الساقط مع عمق التحسين هي (كثير حدود)، وإن الزيادة في كتلة الوزن الساقط من أجل نفس ارتفاع السقوط تملك تأثيراً كبيراً على عمق التحسين، وخاصة عندما يكون ارتفاع السقوط كبيراً.

كما أن زيادة ارتفاع السقوط تسبب زيادة في عمق التحسين ويعود ذلك إلى زيادة طاقة الرص المطبقة والمتعلقة بجداء كتلة الوزن الساقط بارتفاع السقوط.

ثالثاً- تأثير كتلة الوزن الساقط وارتفاع السقوط على التحسين الجانبي:

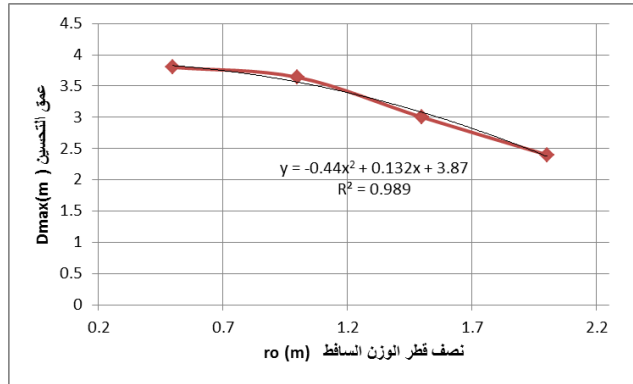
من أجل دراسة تأثير كل من كتلة الوزن الساقط W وارتفاع السقوط H على التحسين الجانبي R_{max} بالرص الديناميكي قمنا بحساب التحسين الجانبي المتوقع لكل نوع من

كما نجد أيضاً أن زيادة ارتفاع السقوط تسبب زيادة في التحسين الجانبي ويعود ذلك إلى زيادة طاقة الرص المطبقة والمتعلقة بجداء كتلة الوزن الساقط بارتفاع السقوط.

رابعاً-تأثير نصف قطر الوزن الساقط r_0 على فعالية الرص الديناميكي:

من أجل دراسة تأثير نصف قطر الوزن الساقط أجرينا الحساب العددي من أجل تربة ذات كثافة نسبية أولية $Dr=25\%$ وكتلة الوزن الساقط $w=20\text{ton}$ يسقط من ارتفاع $H=20\text{m}$. وتم حساب قيمة الإجهاد الناتج عن عملية الصدم مع زيادة نصف القطر وذلك من أجل قيم لنصف قطر الوزن الساقط $(r_0=0.5-1-1.5-2\text{m})$.

يبين الشكل (13) تغيير عمق التحسين مع تغيير نصف قطر الوزن الساقط حيث تم حساب قيمة الإجهاد الناتج عن عملية الصدم مع زيادة نصف القطر،



الشكل (13) تأثير نصف قطر الوزن الساقط على عمق التحسين مع تغيير قيمة الإجهاد الديناميكي.

نجد من الشكل تناقص عمق التحسين بزيادة نصف القطر. إن الوزن الساقط ذا نصف القطر الكبير، يقوم بتوزيع قوة الرص على مساحة أكبر، مما يقلل بشكل فعال من إجهاد الرص ويحد من عمق التحسين.

الاستنتاجات والتوصيات:

تتيح دراسة الرص الءبناميكي عءءياً التنبؤ بعءق التحسين المتوقع والتي تساهم في تحءبء صلاحية استخدام هذه الطريقة في تحسين تربة موقع ما. ولقد وءءنا ما يلي:

1. بزداء كل من عمق التحسين والتحسن الجانبى مع بزيادة كل من ارتفاع السقوط وكنلة الوزن الساقط، ولكن البارامتر المسيطر على عمق التحسين هو كنلة الوزن الساقط أكثر من ارتفاع السقوط.

2. يقل عمق التحسين والتحسن الجانبى مع بزيادة الكنافة النسبية الأولى للتربة، وذلك بسبب بزيادة ارتصاص التربة وقلة المسامات بين جزبئات التربة.

3. استخدام وزن ساقط ذى نصف قطر كببر، بسبب توزبع قوة الرص على مساحة أكبر، مما يقل بشكل فعاع من إجهاء الرص ويءء من عمق التحسين والتحسن الجانبى.

لذلك من الناحية العملية بفضل التفكبر بزيادة كنلة الوزن الساقط والتي تعطى فعالية أكبر للرص الءبناميكي أكثر من بزيادة ارتفاع السقوط.

• التوصيات :

- دراسة شبكة من نقاط الرص لمعرفة مقدار التءاؤل للتحسين الجانبى.

- دراسة تأثير وءوء طبقة قاسية أو رخوة في منطقة الرص الءبناميكي.

Reference:

- 1- Bowels, J.E 1983 *Foundation Analysis and Design*, 4th Edition, McGraw Hill, PP 278.
- 2- Brinkgreve, R. B. J., Harun Kürşat Engin.2010 *Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands* Conference Paper
- 3- Chow, y Yong, D Yong, K & Lee, S 1994 *Dynamic Compaction OF Loose Granular Soils: Effect of Print Spacing* Journal of geotechnical Engineering ,Vol .120 . 1115-1133
- 4- Ehade, F and Shahrour, I 2004 *Analysis of clasclly twin tunneles in urban area* Acted u colloque international de Geotechnique Beyrouth, pp.221-226.
- 5- Gupta, N 1983 *Response Of Buried Piplines To Surface Impact Loads* Department Of civil Engineering, NC State University PP 1-4.
- 6- Jafarzadeh ,F 2006 *Dynamic Compaction Method in Physical Model Tests* Scientia Iranica, Sharif University of Technology, Vol. 13. 187-192
- 7- Massarsch, K. R 1993 *Man-made Vibrations and Solutions, State-of-the-Art Lecture*, Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Vol. 2. 1393 - 1405.
- 8- Oshima, A and Takada, N 1997 *Relation between compacted area and ram momentum by heavy tamping* Proc., 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3. 1641–1644.
- 9- Pan, j & Selby, A 2002 *Simulation of Dynamic Compaction of Loose Granular Soils* University of Durham ,vol. 33.631-640.
- 10- Ping, X 2012 *In-situ Tests and Three-dimensional FEM Analysis of Dynamic Compaction Effects of High Filled Embankment* EJGE, Vol. 17 . 3233- 3244.
- 11- SCOTT, B JAKSA, M and MITCHELL, P 2019 *Ground response to rolling dynamic compaction* Geotechnique letters , pp99-105.

- 12- Leonards, G. A Cutter, W. A and Holtz, R. D 1980 *Dynamic compaction of granular soils* Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.106. 35-44.
- 13- Mayne,PW 1985 *Ground Vibrations During Dynamic Compaction* ASCE Soil Dynamics Committee Convention, 247-65.
- 14- Menard, L and Broise, Y 1975 *Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation* Geotechnique, Vol. 25. 3-17.

