دراسة دور العطالة للكتلة في الأساسات السطحية باستخدام الطاولة الاهتزازية

عناية علي *،علي العبدالله، تركي طبق*****

* طالبة دكتوراه قسم الهندسة الجيوتكنيكية ، كلية الهندسة المدنية ، جامعة حمص

** أستاذ ، قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، جامعة حمص

*** باحث في مركز الدراسات والبحوث العلمية

ملخص البحث:

تفترض إجراءات تقييم قابلية التسييل التقليدية أن زيادة الإجهاد الفعال الشاقولي (بسبب زيادة الضغط المطبق الناتج عن وجود الأساس والحمولة الهيكلية) تحسن من مقاومة التربة للتسييل. تهدف هذه الدراسة إلى اختبار تأثير زيادة الضغط المطبق الناتج عن الأساس على سطح تربة رملية مشبعة وذلك على زمن بدء التسييل تحت التحميل الدوري وهبوطات الأساس الناتجة وتغيرات ضغط ماء المسام، مع التركيز على التداخل بين تأثير الإجهاد الفعال الشاقولي وقوى العطالة. أجريت التجارب باستخدام نموذج أساس مربع (0.1m×0.1m) موضوع على سطح عينة رمل نهري مشبع بالكامل، كثافته النسبية 47%. تم تطبيق ضغطين مختلفين (1Kpa-2Kpa). تم تحضير العينة في صندوق التربة الصلب، وطبقت عليها حركة جيبية أفقية باستخدام الطاولة الاهتزازية حيث تردد وتسارع الحركة (0.2g,2Hz)، رصدت خلالها قراءات ضغط ماء المسام الزائد والتسارع والهبوط باستخام حساسات مخصصة. تم حساب معاملات التسييل واستخدام قوانين التشابه حيث أظهرت النتائج حدوث التسييل مبكراً وبشدة أكبر تحت الضغط الأعلى. وبالتالي ظهور دور عطالة الكتلة الإضافية الأمر الذي ولّد إجهادات قص أعلى في التربة تحت الأساس، متفوقاً على التأثير الإيجابي لزيادة الإجهاد الفعال. تدعو النتائج إلى مراجعة إجراءات تقييم التسييل الحالية لتشمل تأثير التفاعل الديناميكي بين التربة والمنشأ، وبالأخص مساهمة الكتلة في العطالة، عند تقييم قابلية التسييل للأساسات المحمّلة بشدة.

الكلمات المفتاحية: تسييل التربة، حمل الأساس، العطالة، تفاعل ديناميكي بين المنشأ والتربة، طاولة اهتزازية، إجهاد فعال.

Investigating the Role of Mass Inertia in Shallow Foundations Using Shaking Table Tests

, Inaya Ali*,*Ali Alabdullah, Turki Tabakh*****

*Phd Dept of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering , University of Homs
** Prof. Dr. Eng. Department of Geotechnical Engineering, , Faculty of Civil Engineering , University of Homs
*** Dr. Eng. Researcher at the Scientific Studies and Research Center (SSRC)

Abstract

Conventional liquefaction assessment procedures assume that increasing the vertical effective stress (due to increased applied pressure from the foundation and structural load) improves the soil's resistance to liquefaction. This study aimed to investigate the effect of increased applied pressure from the foundation on a saturated sandy soil surface on the liquefaction onset time under cyclic loading, resulting foundation settlement, and pore water pressure variations, focusing on the interplay between the effects of vertical effective stress and inertial forces. Experiments were conducted using a square foundation model (0.1m × 0.1m) placed on the surface of a fully saturated river sand sample with a relative density of 47%. Two different pressures (1 kPa and 2 kPa) were applied. The sample was prepared in a rigid soil box and subjected to horizontal sinusoidal motion using a shaking table with a frequency and acceleration of 0.2g and 2 Hz. Readings of excess pore water pressure (EPWP), acceleration, and settlement were monitored using specialized sensors. Using similitude laws and calculated liquefaction parameters, the results demonstrated that liquefaction occurred earlier and more intensely under higher foundation pressures. This indicates a dominant role for mass inertia, which generates higher shear stresses in the soil beneath the foundation, thereby overriding the stabilizing effect of increased effective stress. These findings advocate for a revision of current liquefaction assessment protocols to incorporate dynamic soil-structure interaction (DSSI), particularly the contribution of structural inertia, when evaluating liquefaction potential for heavily loaded foundations.

Keywords: Soil liquefaction, Foundation load, Inertia, Dynamic Soil-Structure Interaction (DSSI), Shaking table, Effective stress

1-المقدمة:

تسييل التربة (Soil Liquefaction) هو ظاهرة جيوتكنيكية خطيرة تحدث عندما تفقد التربة الرملية المشبعة بالماء مقاومتها، لتتصرف كسائل بدلاً من مادة صلبة تحت تأثير زيادة ضغط ماء المسام، وبالتالي انخفاض الإجهادات الفعالة بسبب الأحمال الديناميكية وأهمها الحركات الزلزالية. تعد هذه الظاهرة من المخاطر الزلزالية المدمرة التي تؤدي إلى انهيارات كبيرة في المنشآت الهندسية، ورغم أن الزلازل غالباً ما تُسبب هذه الزيادة في ضغط ماء المسام، إلا أن أنشطة أخرى كالتفجيرات قد تؤدي أيضاً إلى زيادة هذا الضغط. عند حدوث التسييل، تقل مقاومة التربة وقدرتها على تحمل المنشآت الهندسية فوقها، كما يمكن أن يؤدي التسييل إلى زيادة الضغط على الجدران الاستنادية مما قد يسبب انزلاقها أو ميلانها حيث قد تؤدي هذه الحركة إلى تدمير المنشآت الهندسية على سطح الأرض.
نتيجة لأهمية هذه الظاهرة وآثارها الكارثية الخطيرة فقد اهتم العديد من الباحثين بدراستها (Prasad et al, 2019; Zhang et al, 2020; Koopialipoor et al, 2020; Tang et al, 2021; Karimi & Dashti, 2020;).

في ورقة بحثية تناولها (Sasaki et al, 1992) لدراسة آلية الإزاحة الجانبية للتربة الناتجة عن التسييل باستخدام الطاولة الاهتزازية ذات نطاقين كبير وصغير (استخدام نموذجين فيزيائيين تجريبيين بمقياسين مختلفين كبير وصغير) ، تبين معهم بأن حركة الأرض تحدث في نفس اتجاه تدرج الضغط الكلي، بينما يحدث تشوه قص كبير في الرمال المُسالة، وبأن الإزاحة الأفقية في الطبقة المُسالة معدومة في الأسفل، وأقصى ما يمكن حدوثها هو عند منسوب سطح المياه الجوفية، كما لوحظ بأن الطبقة السطحية غير المُسالة، إن وُجدت، تتحرك مع التربة التحتية المُسالة دون حدوث انزلاق وبأن تأثير قوى العطالة الزلزالية ليس مهمًا مقارنةً بتأثير قوى الجاذبية وبالتالي كانت الإزاحات ناتجة عن انفعالات قص كبيرة في الرمل الذي تمت إسالته عن طريق توليد ضغوط مسامية زائدة.

في دراسة أجراها مجموعة الباحثين (Toyota et al, 2004) توصلوا إلى أن زمن الاهتزاز القوي بعد التسييل يحدد مقدار الإزاحة الأرضية النهائية (زمن الاهتزاز القوي يؤثر على تراكم ضغط المسام وتطور التشوهات اللدنة في التربة)، لذلك يجب تحديد هذا الزمن بدقة للتنبؤ الجيد بالإزاحة الأرضية

الناتجة عن التسييل كما أن سعة اهتزاز القاعدة تؤثر على معدل تطور الإزاحة الجانبية، فكلما زادت شدة الاهتزاز، زادت سرعة تطور الإزاحة الأرضية.

أوجدت دراسة قام بها (Bazaios, K.N., et al. 2022) بأنه قد تعمل قوة العطالة الهيكلية بشكل غير متزامن أو بالتزامن مع حركة التربة حيث تتحكم الخصائص الاهتزازية للمنشأة في تراكم الهبوط الزلزالي، وفي حالة التسييل، تخضع استجابة المنشأة لخصائص التربة في حالتها المتسيلة، كما يرتبط زمن دورة النظام (تربة–منشأ) غير الخطي في حالة التسييل بشكل أساسي بشدة الزلزال وبأن أهم عامل في استجابة النظام هو نسبة زمن دورة النظام (الزمن الدوري الطبيعي للنظام المتكامل (تربة + منشأ)، والذي يتغير مع تقدم التسييل) إلى زمن الإثارة (الزمن الدوري للحركة الزلزالية المطبقة في تجاربنا باستخدام الطاولة الاهتزازية).

قدم (Poulos& Davis,1974) دراسة علمية دقيقة وشاملة للحلول المرنة لتقدير كيفية توزيع الإجهادات داخل التربة عند تحميلها ، كما شرح حلول "Boussinesq" و" Westergaard" لمختلف أشكال الأحمال حيث يوفر معادلات وجداول ورسوم بيانية لحساب توزيع الإجهاد ويغطي الأساسات السطحية والعميقة ويدرس مسألة تفاعل التربة–منشأ SSI وكيفية استجابة التربة للأحمال الخارجية. أما الدراسة العلمية التي قدمها (Stewart & Tiley, 2003) فتعتبر من الدراسات المرجعية الهامة والتي ساهمت في سد الفجوة بين الأبحاث الأكاديمية والممارسة المهنية في مجال تفاعل التربة–منشأ SSI تحديداً في مجال الأساسات السطحية، حيث ركز البحث على تحليل استجابة المباني المقامة على أساسات سطحية (مثل الأساسات المنفصلة أو الحصيرة) خلال حدوث الزلازل، موضحاً أن تجاهل مرونة التربة يؤدي لنتائج غير دقيقة في التصميم الإنشائي ودرس تأثير قوى العطالة للمنشأ (Inertial Interaction) وكيف تؤدي إلى توليد إجهادات إضافية وهبوط ودوران في التربة تحت الأساس.

أجرى الباحثان (Bertalot & Brennan,2021) دراسة علمية باستخدام جهاز الطرد المركزي لربط العلاقة بين بين مقدار الحمل المطبق وقيمة الهبوطات النهائية للأساسات السطحية على الترب الرملية المسيلة حيث وجدا بأنه يوجد هناك ضغطاً حرجاً إذا تجاوزه الحمل، يتحول سلوك الهبوط من هبوط ناتج عن تذبذب ضغط ماء المسام إلى هبوط ناتج عن انهيار بالقص (Shear Failure) أسفل الأساس.

وفي ورقة علمية أخرى لدراسة الاستجابة الزلزالية للأساسات المدفونة (Embedded Foundation) في التربة القابلة للتسييل قدمها (Ziotopoulou, & Gazetas, 2022) من خلال إجراء التجارب باستخدام جهاز الطرد المركزي والمحاكاة العددية حيث توصلا إلى أن زيادة الإجهاد الشاقولي تحمي التربة من التسييل في حالة الزلازل الضعيفة، ولكن في حالة الزلازل القوية، فإن زيادة الإجهاد الشاقولي يصبح عبئاً ويسرع من عملية غوص الأساس داخل التربة المتسيلة.

على صعيد الدراسات العلمية داخل الجمهورية العربية السورية والتي اهتمت بتأثير الهزات الأرضية والزلازل على الجمل الإنشائية فقد تم نشر ورقة بحثية في مجلة جامعة حمص تناولت دراسة تأثير جدران البلوك الإسمنتي على الأداء الزلزالي للإطارات البيتونية المسلحة (الطرشة وآخرون، 2022). وفي ورقة بحثية وضمن نفس الإطار تناولت تقييم سلوك مبنى إطاري مقاوم للزلازل من البيتون المسلح تحت تأثير أحمال الانفجارات (ملحم وخليل، 2022) .

كما تناول بحث علمي آخر دراسة تأثير التفاعل المتبادل بين التربة والمنشأ على الاستجابة الزلزالية للجمل الثنائية كونها الأكثر استخداماً في سوريا، من خلال دراسة السلوك الديناميكي الخطي لهذه الجمل على أساس سطحي باستخدام برنامج النمذجة SAP2000، حيث بين البحث زيادة العزوم الداخلية والمقاطع التصميمية في عناصر الجملة مقارنة مع المنشأ الموثوق، كما بينت ضرورة تطوير الكودات لقيم معامل تعديل الاستجابة الزلزالية الذي يتأثر بعدة متغيرات لنوع الجملة الواحدة منها عدد الطوابق ونوع التربة (الحريري وحسن، 2021).

تتسم التربة القابلة للتسييل بحساسية عالية للتغيرات في الإجهاد الفعال، خاصة عند المستويات المنخفضة (Seed & Idriss, 1971; Idriss & Boulanger, 2008).

كما أظهرت الدراسة المقدمة من قبل الباحثين (Barrios et al., 2020) أن استجابة التربة تحت ضغوط حصر منخفضة تختلف اختلافاً كبيراً عن استجابتها تحت ضغوط عالية، حيث يكون التسييل أكثر سهولة في الحدوث.

وبالرغم من تعدد الأبحاث المهتمة بظاهرة التفاعل الديناميكي بين المنشآت الهندسية والترب القابلة للتسييل إلا أنه لا تزال هناك العديد من النواحي المهمة التي لم يتم التطرق إليها بعد.

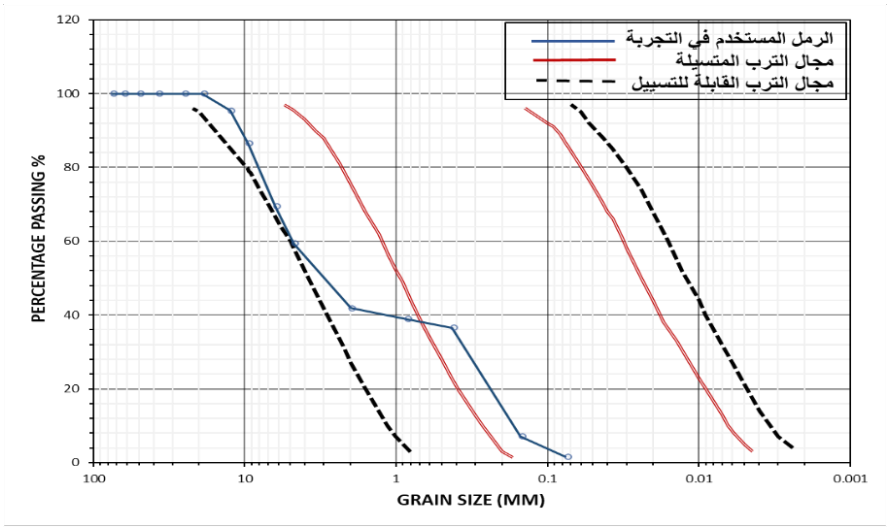
2-هدف البحث:

يهتم هذا البحث بدراسة تأثير تغيير الضغط المطبق الناتج عن وجود الأساس على زمن وقيمة ضغط ماء المسام لحظة حدوث التسييل تحت التحميل الدوري، مع التركيز على دور قوى العطالة للكتلة الإضافية في بدء التسييل وربط النتائج التجريبية بالواقع الهندسي العملي.

3-مواد وطرق البحث:

الرمل المستخدم لتحضير العينة في هذه الدراسة رمل نهري وهو ذو تدرج حبي غير منتظم، حيث يقع منحني التدرج الحبي ضمن نطاق التسييل (Xenaki et al, 2003)، يوضح الشكل (1) منحني التركيب الحبي للرمل المستخدم، بينما يعرض الجدول (1) الخصائص الفيزيائية له.

تم إجراء سلسلة من الاختبارات باستخدام طاولة اهتزازية (0-1 g) تتحرك باتجاه أفقي وحيد، حيث تم تحضير العينة الرملية المشبعة ضمن صندوق التربة الصلب rigid soil box المصنوع من مادة plexi- glass الشفافة المرنة الأبعاد الخارجية: (0.5m, 0.4m, 0.4m) (طول،عرض، ارتفاع) وبسماكة (0.01m). تبلغ أبعاد العينة الرملية المشبعة (0.285m, 0.38m,0.38m) (طول،عرض، ارتفاع). حيث تم اعتماد هذه الأبعاد لتتناسب مع أبعاد صفيحة الطاولة الاهتزازية (0.5*0.5) متر والحفاظ على تطابق مراكز الثقل جميعها للعينة الرملية المشبعة والطاولة ووقوعها على محور شاقولي واحد، وبحيث يكون الوزن الإجمالي للعينة الرملية المشبعة وصندوق التربة الصلب ضمن الحدود المسموحة وأقل من الحمولة الأعظمية المسموحة للنموذج المختبر (350 كغ).



الشكل(1) التدرج الحبي للرمل المستخدم في التجربة

الجدول (1) مواصفات الرمل المستخدم في الاختبارات

نوع الرمل المستخدم في التجربة	رمل نهري
الوزن الحجمي الأعظمي	$\gamma_{d_{max}} = 19.6\ Kn/m^3$
الوزن الحجمي الأصغري	$\gamma_{d_{min}} = 16.7\ Kn/m^3$
الوزن الحجمي المشبع	$\gamma_{sat} = 21.2\ Kn/m^3$
الكتلة الحجمية المشبعة	$\rho_{sat} = \gamma_{sat} * \frac{1000}{9.81} = 2161\ Kg/m^3$
الوزن النوعي	$G = 2.66$
الكثافة النسبية	$D_r = 47\ \%$
نسبة الفراغات الأعظمية	$e_{max} = 0.593$
نسبة الفراغات الأصغرية	$e_{min} = 0.357$
نسبة الفراغات الطبيعية الابتدائية	$e_n = e_0 = 0.482$
درجة الإشباع	$S_r = 100\ \%$
الوزن الحجمي للماء	$\gamma_w = 10\ Kn/m^3$
نسبة النواعم	$F_C = 2\ \%$

تم وضع حساس الضغط في منتصف قاعدة العينة الرملية المشبعة لقياس تغيرات ضغط ماء المسام أثناء الحركة الزلزالية، وحجرة الحساسية الخاصة به ترتفع عن القاعدة (1cm) وبالتالي ارتفاع العينة الصافي فوق حساس الضغط (0.275m)، تم تثبيت حساس التسارع على الأساس لقياس تسارعه ومدى استجابته، كما تم وضع حساس الانتقال على الأساس لقياس الهبوطات الناتجة عنه أثناء الحركة الزلزالية ، لاحظ الشكل(2). أما أبعاد الأساس المستخدم في التجربة فهي:
(B'=0.1m*0.1m) لتقليل تداخل إجهادات المنشأ مع جدران صندوق التربة. خضع صندوق التربة الصلب مع العينة الرملية المشبعة إلى حركة جيبية بتسارع 0.2g وتردد 2Hz باستخدام الطاولة الاهتزازية. تمت الدراسة في حالة السطح الحر (بدون وجود أساس) وفي حالة وجود أساس على سطح التربة بحيث يكون الضغط المطبق الناتج عن وجود الأساس مرة يساوي 1Kpa، ومرة يساوي 2Kpa.

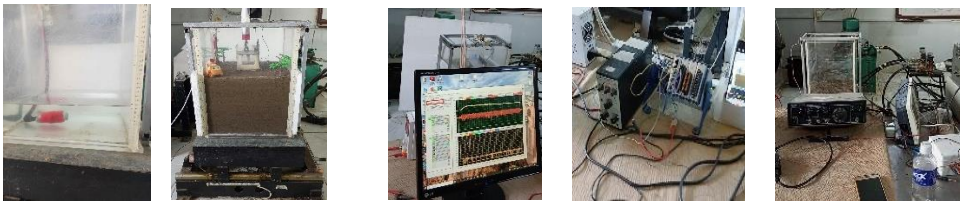
وبتطبيق القوانين حسب (Coduto, D. P. 2001) تم حساب الإجهاد الفعال الناتج عن وزن التربة كما يلي:

قيمة الإجهاد الكلي للتربة $\sigma_{total} = \gamma_{sat} * z = 21.2 * 0.275 = 5.83\ kn/m^2$

قيمة ضغط ماء المسام الإبتدائي $u_{static} = \gamma_w * z = 10 * 0.275 = 2.75\ kn/m^2$

الإجهاد الفعال الأولي للتربة قبل بدء حركة الطاولة الاهتزازية وفي حالة السطح الحر:

$$\sigma'_{initial} = \sigma'_{soil} = \sigma_{total} - u_{static} = 5.83 - 2.75 = 3.08\ kn/m^2$$



e d c b a

الشكل (2) يبين جزء من مراحل الاختبار مع توضيح لمواقع الحساسات المستخدمة حيث: a الطاولة الاهتزازية وعليها صندوق التربة الصلب ، b مجموعة محصل البيانات موصولا بها حساس ضغط ماء المسام وحساس التسارع ومقياس الانتقال الشاقولي و وحساس الانتقال الأفقي الخاص بالطاولة ، c شاشة برنلمج معالجة الإشارات القادمة من محصل

البيانات ، d موقع حساس ضغط ماء المسام في قاعدة العينة ، e وضع الأساس مثبت عليه حساس التسارع ومقياس الانتقال.

وبالتالي حساب نسبة ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل من العلاقة $r_u = \frac{u_{excess}}{\sigma'_{initial}}$ حيث يحسب الإجهاد الإضافي الناتج عن المنشأ ($\Delta\sigma_v$) من العلاقة التالية:

حيث الأساس مربع وبالتالي $B' = L'$ ، $\Delta\sigma_v = q \times \frac{B' \times L'}{(B'+Z)\times(L'+Z)}$

عند الضغط q= 1Kpa : $\Delta\sigma_v = 1 \times \frac{0.1 \times 0.1}{(0.1+0.275)\times(0.1+0.275)} = 0.071\ Kpa$

عند الضغط q= 2Kpa : $\Delta\sigma_v = 2 \times \frac{0.1 \times 0.1}{(0.1+0.275)\times(0.1+0.275)} = 0.142\ Kpa$

وبالتالي تصبح قيمة الإجهاد الفعال الأولي عند حجرة الحساسية لحساس ضغط ماء المسام بعد إضافة الإجهاد الناتج عن وجود الأساس كما يلي:

عند الضغط q= 1Kpa : $\sigma'_{v1} = 3.08 + 0.071 = 3.151\ Kpa$

عند الضغط q= 2Kpa : $\sigma'_{v2} = 3.08 + 0.142 = 3.222\ Kpa$

بالاعتماد على قيمة الكثافة النسبية 47% للرمل المستخدم في التجربة يمكن تقدير CRR نسبة مقاومة الإجهاد الدوري أي مقاومة التربة للتسييل حسب (Idriss & Boulanger 2008) عند عدد دورات N=15 من العلاقة التالية:

$$CRR_{M=7.5} = \exp\left(\frac{(N1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right)$$

يمكن تقدير $(N1)_{60}$ من Dr باستخدام علاقة SPT حيث $(N1)_{60_{cs}}$ هي القيمة المصححة المكافئة للكثافة النسبية، $D_r = 0.1\sqrt{(N1)_{60}} \Rightarrow (N1)_{60} = 22.1$ ، نأخذ $(N1)_{60_{cs}} \approx 22$. وبتعويض القيم نحصل على قيمة $CRR_{15} \approx 0.233$ وباستخدام عامل تعديل الدورات لـ CRR عند $N=15$ دورة إلى قيم N أخرى CRR(N) و في هذه الدراسة وحسب عدد الدورات الفعلية لبدء التسييل N_{liq} نستخدم العلاقة التالية للتحويل من N=15 إلى N_{liq} من العلاقة التالية:

$$CRR(N) = CRR_{15} \cdot \left(\frac{15}{N_{liq}}\right)^{0.2}$$

باستخدام نموذج شعاع القص حسب (Kramer, 1996) وفي لحظة بدء التسييل يمكن حساب إجهاد القص الدوري المطبق τ_{cyc} عند منتصف العينة (وفي هذه الدراسة عند موقع حساس ضغط ماء المسام) من العلاقة التالية:

$$\tau_{cyc} = \frac{\rho_{sat} \cdot H}{4} (a_t + a_s)$$

تؤخذ كثافة التربة بـ Kg/m^3 و ارتفاع العينة فوق حساس ضغط ماء المسام بالمتر والتسارعات بـ m/sec^2 حيث a_t تسارع الطاولة و a_s تسارع المنشأ . ومن ثم يمكننا حساب قيمة CSR نسبة الإجهاد الدوري (أي مقدار إجهاد القص الدوري الذي تحدثه الزلازل في طبقة التربة) عند موقع حساس الضغط مع الأخذ بعين الاعتبار الإجهادات الإضافية القادمة من الأساس:

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_V}$$

وبالتالي يتم حساب معامل الأمان من العلاقة التالية: $FS = \frac{CRR_{N_{liq}}}{CSR}$.

كما تم حساب انفعال القص الأعظمي لحظة بدء التسييل Υ_{max} عند موقع حساس الضغط من العلاقة التالية:

$$\Upsilon_{max} = \frac{a_{s,max} - a_{t,max}}{(2\pi f)^2 \cdot H} .$$

يجب التنويه إلى أنه تم حساب τ_{cyc} و Υ_{max} قبل التسييل، أي في المرحلة التي لا تزال التربة فيها تحتفظ بصلابتها نسبياً وفي حالتنا، عند t_{liq} حيث قد تكون التربة قد دخلت بالفعل في مرحلة انتقالية، لكن يمكننا استخدام قيم التسارع عند تلك اللحظة، لأن قيم التسارع عند هذه اللحظة t_{liq} لا تزال تمثل ذروة مرحلة ما قبل التسييل قبل أن تبدأ بالانخفاض وهي الأنسب لحساب الإجهادات القصية المؤدية إلى التسييل. تم إيجاد قيمة معامل القص G_{secant} لحظة بدء التسييل وهو يعكس صلابة التربة في نطاق التشوهات اللدنة (الغير خطية) مع الانتباه إلى أن هذه الحسابات تفترض أن التربة تتصرف كمادة مستمرة متجانسة، وأن القص هو المسيطر، وهو ما ينطبق على تجربة الصندوق الصلب مع الاهتزاز الأفقي في هذه الدراسة. حيث تقدر قيمة معامل القص من العلاقة التالية:

$$G_{secant} = \frac{\tau_{max}}{\Upsilon_{max}}$$

تؤخذ τ_{max} بـ Kpa وبالتالي G_{secant} بـ Kpa. وأخيراً وللربط بين نظام تربة–أساس تم حساب قيمة معامل الانتقال وهو يمثل قدرة النظام على تضخيم أو تخميد الحركة الزلزالية المتولدة باستخدام الطاولة الاهتزازية من العلاقة التالية: $T_r = \frac{a_s}{a_t}$

وباستخدام قوانين التشابه (Iai, 1989) التي تربط العلاقة بين النموذج المصغر (Model) والمنشأ الحقيقي (Prototype)، هذه القوانين تستند إلى معادلات السلوك الأساسية للتربة والمائع والمنشأ، واختيار λ معامل القياس بحيث يمثل ارتفاع العينة الرملية المشبعة في النموذج (Hm=0.285m) سماكة طبقة تربة رملية مشبعة حقيقية منطقية (ارتفاعها عادة بين 3 – 10 متر) حيث تم اعتباره 1/20 وهي قيمة سهلة الحساب (λ = 1/20 = 0.05).

وبالتالي فإن ارتفاع التربة الحقيقي Hp = 5.7 m وعرض الأساس (B'= 2m) والضغط الناتج عنه هو مرة (1Kpa) ومرة (2Kpa) حيث تم ربط النتائج التجريبية بالواقع الهندسي ومناقشتها.

4–النتائج ومناقشتها:

بعد تطبيق الحركة الزلزالية المتولدة بواسطة الطاولة الاهتزازية تم التوصل إلى النتائج التالية:

الأشكال (3) و(4) و(5) و(6) توضح نتائج الاختبار في حالة السطح الحر، تطور ضغط ماء المسام مع الزمن، الهبوطات الشاقولية للأساس مع الزمن، تسارعات الأساس مع الزمن، على التوالي. من الجدول (2) نلاحظ بأن العلاقة بين الضغط المطبق الناتج عن وجود الأساس وبين عدد الدورات لحظة بدء التسييل هي علاقة غير خطية مقارنة مع حالة السطح الحر، هذا السلوك الغير خطي غير متوقع في حال لو اعتمدنا فقط على تأثير ضغط الحصر (الذي يزيد مقاومة التربة للتسييل مع زيادة الإجهاد الفعال) إلا أنه يظهر هنا أن مضاعفة الضغط أدت إلى حدوث تسييل أسرع، وهو ما يتوافق مع تأثير قوى العطالة للكتلة الإضافية وتغير نمط التفاعل الديناميكي بين التربة والأساس. مع زيادة الحمل، كانت نسبة الضغط المسامي عند لحظة بدء التسييل أقل، هذا يعني أن التسييل (حسب معيار الانخفاض الحاد في التسارع أو بداية الهبوط السريع) حدث مبكراً (عدد دورات أقل حيث انخفض عدد الدورات بنسبة 28%) وعند قيمة أقل لضغط المسام في القاعدة. ويفسر ذلك بأن منطقة التسييل بدأت بالقرب من الأساس (في الطبقات الضحلة) وانتشرت لاحقاً إلى الأسفل، تحت الحمل الأكبر، وبالتالي المنطقة المحيطة بالأساس تتسيل أسرع بسبب زيادة قوى العطالة، مما أدى إلى

وصول إشارة الانخفاض في التسارع حيث $a_s<a_g$ (المرتبطة بفقدان قدرة التربة على نقل موجات القص) في وقت أبكر، بينما كان الحساس في القاعدة لا يزال يسجل ضغطاً منخفضاً نسبياً.

الجدول (2) يوضح نتائج التجارب التي تم الحصول عليها للنموذج في التجربة

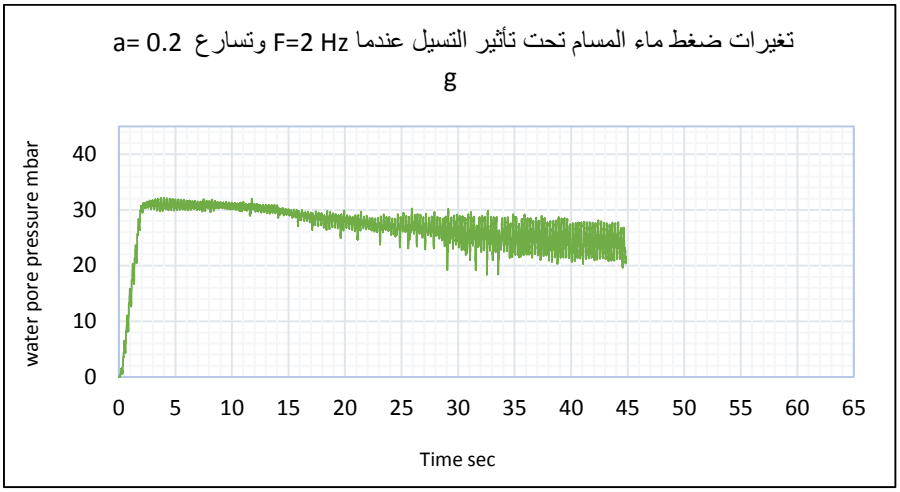
الضغط	t_{liq} (s)	N_{liq}	Δu (kPa)	ru	a_s (g)	d_v (mm)
السطح الحر	2.205	4.41	3.12	1.013	----	-----
1 kPa	4.03	8.06	1.822	0.587	0.217	0.592
2 kPa	2.89	5.78	1.487	0.462	0.089	4.074

بالنسبة لمقارنة الهبوط فنلاحظ أنه عند q=2 Kpa، الهبوط (4.074 مم) أكبر بحوالي 7 مرات منه عند q=1 Kpa (0.592 مم) وهذا يدل على أن التربة تحت الحمل الأكبر تعرضت لتشوهات لدنة كبيرة جداً، مما يؤكد حدوث تسييل شامل في طبقة سميكة حول الأساس كان أكثر شدة وانتشاراً.
وبمقارنة التسارعات فنلاحظ بأنه عند q=2 Kpa، فإن قيمة التسارع على المنشأ قد انخفضت إلى (0.089g) (تخميد) أي 44.5% من قيمة 0.2 g للطاولة، بينما عند q=1 Kpa كان التسارع (0.217g) (تضخيم)، الانخفاض الحاد في التسارع هو مؤشر رئيسي على فقدان التربة لقدرتها على نقل موجات القص للأساس بعد التسييل.

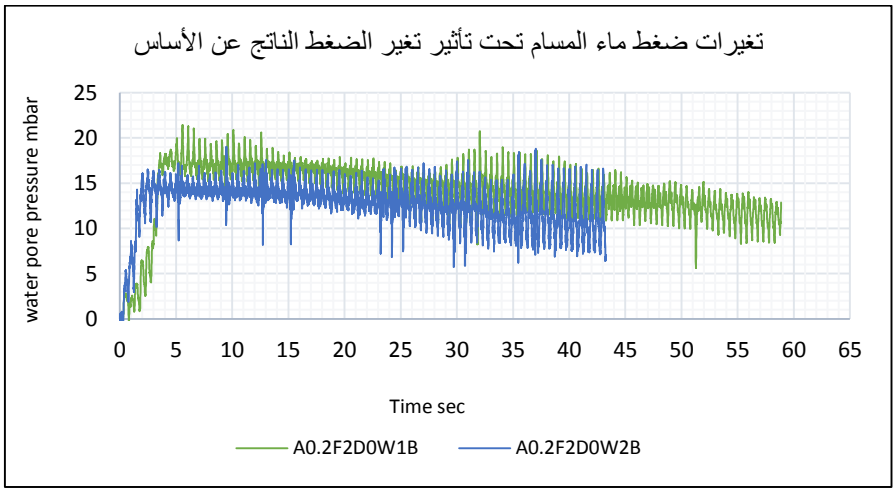
الجدول (3) يوضح قيم معاملات التسييل المختلفة وسلوك النظام

$\tau_{cyc}\ kpa$	σ'_V	CSR	$CRR_{N_{liq}}$	FS	Υ_{max}	$G_{secant}\ kpa$	$T_r = a_{s/0.2g}$	سلوك النظام
0.608	3.151	0.193	0.264	1.368	0.00385	158	1.085	تضخيم وحدث تسييل جزئي
0.421	3.222	0.131	0.282	2.153	0.0251	16.773	0.445	انهيار (تخميد شديد) حدث تسييل مبكر بسبب قوى العطالة المرتفعة

من الجدول (3) وبالنظر إلى قيم معامل القص ومعامل الانتقال في الحالتين حيث تعتبر هذه المقارنة هي النتيجة المحورية، نلاحظ عند بزيادة الضغط المطبق إلى الضعف، بأن معامل القص قد انخفضت قيمته كثيراً مما يدل على فقدان التربة صلابتها إلى العشر تقريبا ودخلت المرحلة السائلة في المنطقة المحيطة بالأساس، أما معامل الانتقال فقد انخفض إلى أقل من النصف، حيث انهارت التربة فجأة في نقل الحركة، وهذا ما يؤكد الدور الحاسم لتأثير قوى العطالة (Inertia Forces)، فزيادة الكتلة زادت من الضغط على التربة مما أدى إلى انهيارها بشكل أسرع بكثير.

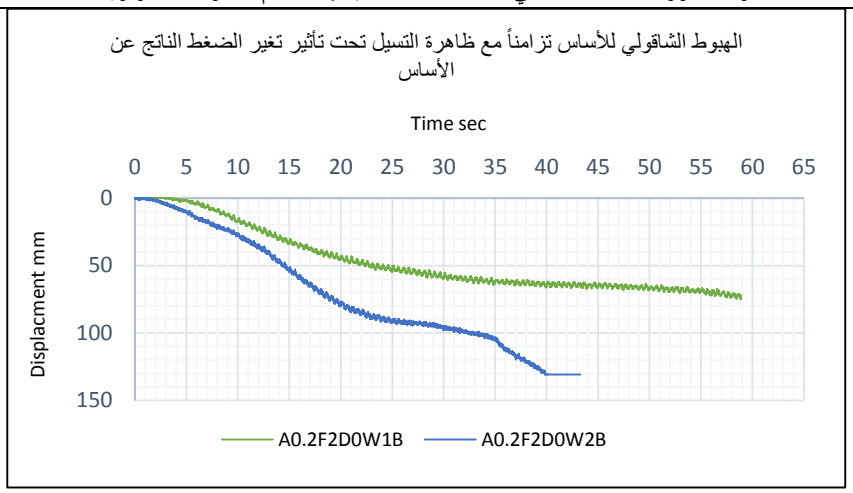


الشكل (3) نتائج الاختبار في حالة السطح الحر (بدون وجود أساس)

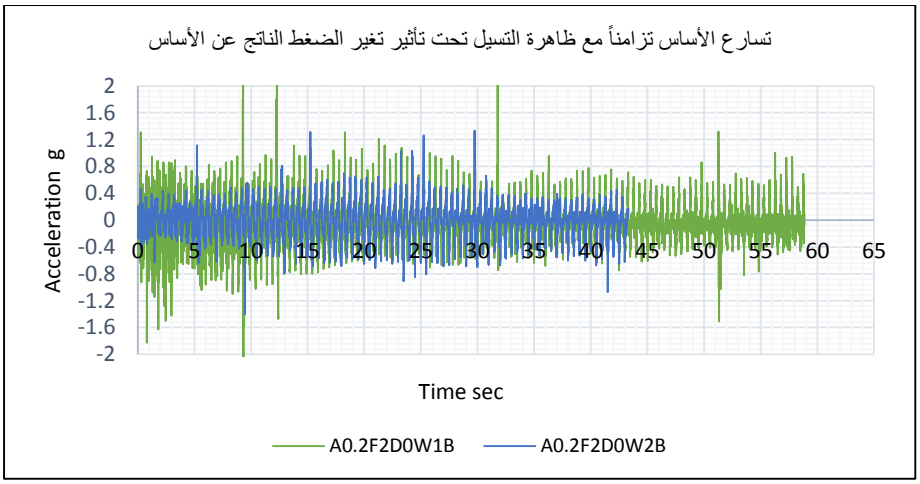


الشكل (4) يوضح تطور ضغط ماء المسام مع الزمن خلال الحركة الزلزالية حيث : A0.2F2D0W1B يعبر عن تطور ضغط ماء المسام في حال الضغط يساوي 1Kpa، A0.2F2D0W2B يعبر عن تطور ضغط ماء المسام في حال الضغط يساوي 2Kpa.

ربط مدخلات حركة الطاولة الاهتزازية بالسجل الحقيقي للزلزال: بالنظر إلى الجدول (4) وبتطبيق قانون التشابه حيث $prototype = \frac{model}{\text{معامل القياس الخاص}}$ تم ربط نتائج النموذج المستخدم في تجربة



الشكل (5) يوضح الهبوط الشاقولي للأساس مع الزمن خلال الحركة الزلزالية حيث : A0.2F2D0W1B يعبر عن الهبوط الشاقولي في حال الضغط يساوي 1Kpa، A0.2F2D0W2B يعبر عن الهبوط الشاقولي في حال الضغط يساوي 2Kpa.



الشكل (6) يوضح تسارعات الأساس مع الزمن خلال الحركة الزلزالية حيث : A0.2F2D0W1B يعبر عن قيم تسارع الأساس في حال الضغط يساوي 1Kpa، A0.2F2D0W2B يعبر عن قيم تسارع الأساس في حال الضغط يساوي 2Kpa.

الطاولة الاهتزازية الواردة في الجدول (2) وتحويلها إلى نتائج زلزال حقيقي على أرض الواقع. حيث عدد الدورات حتى بدء التسييل في النموذج يتوافق مع عدد دورات الإجهاد الفعال للزلزال الحقيقي.

لربط الحركة الجيبية بزلزال حقيقي، يمكن استخدام مفهوم الإجهاد الدوري المكافىء CSR وهو في هذه الدراسة يسجل زلزال بتردد 0.212 هرتز وأقصى تسارع له 0.2g وهذه القيمة تمثل زلزالاً متوسطاً إلى قوي في الكودات الهندسية، على سبيل المثال، سجل زلزال دارفيلد في نيوزيلندا (2010) بقوة 7.1 درجة حيث وصلت قيمة PGA ذروة التسارع الأرضي إلى 0.2g والتي سجلتها محطة دارفيلد (Bradley, B. A. 2013).

الجدول (5) يبين النتائج الحقيقية على أرض الواقع والتي يخلفها هذا الزلزال حيث يسجل أساس أبعاده 2*2 متر وبضغط ناتج عنه بقيمة 20 كيلو باسكال عند الثانية 30.02 وبمعدل 8 دورات للإجهاد الفعال وصلت قيمة نسبة ضغط ماء مسام إلى0.587 أي نسبة 65% من حدوث التسييل (تسييل جزئي) على عمق 5.5 متر وتسارع قدره 0.217 g أكبر من تسارع الزلزال (تضخيم) وهبوط مقداره 53.82 mm يمثل خطورة انشائية تبدأ بتشققات في الأعمدة والجسور. أما في الحالة الثانية وبضغط ناتج عنه بقيمة 40 كيلو باسكال عند الثانية 27.26 وبمعدل 5.78 دورة للإجهاد الفعال وصلت قيمة نسبة ضغط ماء مسام إلى 0.462 أي نسبة 51% من حدوث التسييل على عمق 5.5 متر وتسارع قدره 0.089 g أقل بكثير من تسارع الزلزال (تخميد شديد). وهبوط مقداره 370.36 mm يمثل خطورة انشائية فائقة والمنشأ غالباً سيعاني من إمالة حادة (Tilting) أو غرق جزئي في التربة، مما يجعله غير قابل للاستخدام أو مهدداً بالانهيار الكامل. وبالتالي يمكن اعتبار أن انخفاض قيمة تسارع المنشأ إلى أقل من 0.1g مؤشر يمكن استخدامه في أنظمة الإنذار المبكر.

الجدول(4) يوضح معاملات القياس حسب (Iai, 1989) باعتبار $\lambda_\varepsilon = \lambda^{0.5}$, $\lambda_p = 1$

الكمية الفيزيائية	الرمز	العلاقة مع λ	القيمة عند $\lambda = 1/20 = 0.05$
الطول	L	λ	0.05
الزمن	t	$\lambda^{0.75}$	$0.05^{0.75} \approx 0.106$
التردد	f	$\lambda^{-0.75}$	$1/0.106 \approx 9.43$
التسارع	a	1	1
السرعة	v	$\lambda^{0.75}$	$0.05^{0.75} \approx 0.106$
الإزاحة	d	$\lambda^{1.5}$	0.011
الإجهاد الكلي للتربة	σ	λ	0.05

الإجهاد الفعال للتربة	σ'	λ	0.05
انفعال التربة	ε	$\lambda^{0.5}$	$0.05^{0.5} \approx 0.224$
كثافة التربة المشبعة	ρ	1	1
ضغط ماء المسام	p	λ	0.05
معامل القص	G	$\lambda^{0.5}$	$0.05^{0.5} \approx 0.224$
الكتلة	m	λ^3	$0.05^3=1.25\times10^{-4}$
عزم العطالة	I	λ^5	$0.05^5=3.125\times10^{-7}$

الجدول (5) يوضح نتائج التجارب التي تم الحصول عليها للمنشأ الحقيقي

الضغط	أبعاد الأساس	تردد الزلزال	تسارع الزلزال	t_{liq} (s)	N_{liq}	Δu (kPa)	r_u	a_s (g)	d_v (mm)
السطح الحر	----	0.212	0.2 g	20.8	4.41	62.4	1.013	----	-----
20 kPa	2 m	0.212	0.2 g	30.02	8.06	36.44	0.587	0.217	53.82
40 kPa	2 m	0.212	0.2 g	27.26	5.78	29.74	0.462	0.089	370.36

5-الاستنتاجات والتوصيات:

- أدت مضاعفة الضغط الساكن من 1 إلى 2 كيلو باسكال (100%) إلى حدوث تسييل أسرع على الرغم من زيادة الإجهاد الفعال الابتدائي بمقدار طفيف (0.071 Kpa) مما يؤكد بأن قوى العطالة للكتلة الإضافية تلعب دوراً حاسماً في لحظة بدء التسييل وتسريع حدوثه، نلاحظ عدم التناسب مع زيادة ضغط الحصر وبالتالي العلاقة عكسية بين الضغط وزمن بدء التسييل وهو ما يتعارض مع الافتراضات التقليدية. بالإضافة إلى ما سبق فلو كانت زيادة الإجهاد الفعال هي العامل الوحيد لكانت قيمة N_{liq} عند q=1 أكبر من قيمتها عندما q=2، مما يؤكد أن تأثير قوى العطالة للكتلة وتغير توزيع الإجهادات الديناميكية هما المسيطران في هذه الحالة.
- بالنسبة للهبوط والتسارع عند q=2 Kpa نلاحظ بأن الهبوط كان أكبر حوالي 7 مرات وتسارع الأساس انخفض كثيراً وهذا يشير إلى أن التسييل كان أكثر شمولاً وشدة عند الحمل الأكبر.
- التفسير الفيزيائي والميكانيكي لما سبق هو أنه عندما تزداد قوى العطالة للمنشأ تزداد الإجهادات القصية في التربة حول الأساس ويبدأ التسييل في الطبقات الضحلة مبكراً ثم

ينتشر إلى الأسفل. حساس ضغط ماء المسام في القاعدة يسجل ارتفاعاً متأخراً وهذا ما تمت ملاحظته من قيمة نسبة ضغط ماء المسام.

- مضاعفة الضغط في دراستنا هذه تعني مضاعفة قوى العطالة التي يسببها وزن المنشأ، هذه القوى الإضافية رغم أنها تزيد من قيم الإجهادات الفعالة والتي من المفترض أن تقاوم التسييل، فإنها في الواقع تزيد من إجهادات القص المطبقة على التربة بوتيرة أسرع، مما يؤدي إلى انهيار التربة قبل أن يتسنى لها فرصة مقاومة التسييل. وبالتالي تسريع حدوث التسييل وانخفاض معامل الانتقال بشكل حاد، كما أن مضاعفة الكتلة جعلت التردد الطبيعي للنظام تربة–أساس ينخفض بسرعة مع بداية ارتفاع ضغط المسام، مما أدى إلى المرور بحالة الرنين في وقت مبكر جداً (أثناء ارتفاع الضغط) ثم انهيار الصلابة بسرعة.
- النتائج السابقة تحذر من الاعتماد فقط على زيادة الإجهاد الفعال لتقييم مقاومة التسييل تحت الأساسات وتؤكد أهمية أخذ تأثير العطالة والكتلة المشاركة في الاعتبار عند تصميم الأساسات في المناطق الزلزالية. وبالتالي مراجعة معايير تقييم قابلية التسييل للمباني الثقيلة.
- استخدام مؤشرات الطاقة والصلابة في التصميم الزلزالي حيث يمكن تطوير معايير تصميم تعتمد على الطاقة الزلزالية المسموحة (بدلاً من التسارع فقط) أو على الحد الأدنى المسموح به لمعامل القص خلال الزلزال.
- معايرة النماذج العددية لتشمل تأثير قوى العطالة والكتلة المشاركة.
- مراقبة المباني باستخدام مقاييس التسارع كمؤشر إنذار مبكر للإنهيار في حال انخفضت قيمة التسارع إلى أقل من 0.1g.
- مراجعة معايير التصميم بحيث تتضمن أكواد التصميم عوامل تصحيح لـ CSR تأخذ بعين الاعتبار كتلة المنشأ وعطالته.
- الحذر من المباني متوسطة الثقل فقد تكون أكثر عرضة للانهيار بسبب التسييل مقارنة بالمباني الخفيفة أو الثقيلة جداً وذلك اعتمادا على موقعها على منحني الرنين.
- نوصي في الدراسات المستقبلية بتوسيع نطاق الضغوط المطبقة لتشمل قيماً إضافية أكبر (مثل 5، 10، 20 كيلو باسكال) في النموذج ، والتي تمثل (100–200–400 كيلو

باسكال) في الواقع لتغطية نطاق أوسع من المنشآت، وتكرار التجارب لتأكيد النتائج وتقليل هامش الخطأ. كما نوصي بدراسة تأثير التفاعل بين الضغط وعوامل أخرى (مثل مساحة الأساس وعمق التأسيس) بشكل أكثر شمولاً.

6-المراجع:

الحريري، حليمة.، وحسن، هالة. 2021. تأثير التفاعل المتبادل بين التربة والمنشأ في الاستجابة الزلزالية للجمل الثنائية. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (43)، العدد 16، 11-40.

الطرشة، إحسان.، عيسى، عبد الرحمن.، والأبو حسين، محمد رافع. 2022. دراسة تأثير جدران البلوك الإسمنتي على الأداء الزلزالي للإطارات البيتونية المسلحة. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (44)، العدد 14، 11-42.

ملحم، عصام.، وخليل، عاصم. 2022. تقييم سلوك مبنى إطاري مقاوم للزلازل من البيتون المسلح تحت تأثير أحمال الانفجارات. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (44)، العدد 16، 11-50.

Barrios, G., Larkin, T., & Chouw, N. (2020). Influence of shallow footings on the dynamic response of saturated sand with low confining pressure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105872.

Bazaios, K. N., Tasiopoulou, P., & Gazetas, G. (2022). Effect of structural inertia on liquefaction-induced settlements of shallow foundations. *Engineering Structures*, *272*, Article 115041. doi.org

Bertalot, R., & Brennan, A. J. (2021). Influence of foundation geometry and pressure on the settlement of shallow foundations on liquefiable sands. *Géotechnique*, *71*(10), 870–884. doi.org

Bradley, B. A. (2013). The 2010–2011 Canterbury Earthquake Sequence (CES). *ScienceDirect.*

Coduto, D. P. (2001). *Foundation design: Principles and practices* (2nd ed.). Prentice Hall.

Iai, S. (1989). Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *Soils and Foundations*, *29*(1), 105–118. doi.org

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes* (Monograph MNO-12). Earthquake Engineering Research Institute.

Karimi, Z., & Dashti, S. (2020). Seismic performance of shallow foundations on liquefiable soils: A review of physics-based models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *137*, Article 106266. doi.org

Koopialipoor, M., Murlidhar, B. R., Hedayat, A., Armaghani, D. J., Gordan, B., & Khorami, M. (2020). The use of advanced intelligent techniques in predicting the maximum settlement in liquefiable soils. *Engineering with Computers*, *36*(4), 1711–1721. doi.org

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1974). *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. John Wiley & Sons.

Prasad, C. H. N., Chary, M. R., & Thangamani, K. (2019). Analysing and preventing the problems of liquefaction in soils. *International Journal of Engineering Research & Technology*, *8*(6), 748–753. doi.org .

Sasaki, Y., Towhata, I., Tokida, K., Yamada, K., Matsumoto, H., Tamari, Y., & Saya, S. (1992). Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction. *Soils and Foundations*, *32*(3), 79–96. doi.org.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249-1273.

Stewart, J. P., & Tilley, G. E. (2003). Soil–structure interaction for buildings on shallow foundations. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1–15. doi.org.

Tang, L., Ling, X., Xu, P., & Ghalandarzadeh, A. (2021). Dynamic soil-structure interaction of pile-supported bridges in liquefying soils: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *143*, Article 106571. doi.org

Toyota, H., Towhata, I., Imamura, S.-I., & Kokusho, T. (2004). Shaking table tests on flow dynamics in liquefied slope. *Soils and Foundations*, *44*(5), 67–84. doi.org .

Xenaki, V. C., & Athanasopoulos, G. A. (2003). Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An experimental investigation of the effect of fines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *23*(3), 183–194. doi.org

Zhang, W., Asai, M., & Fujii, K. (2020). Numerical simulation of dynamic soil-structure interaction in liquefiable soils using a stabilized SPH method. *Ocean Engineering*, *218*, Article 108226. doi.org

Ziotopoulou, K., & Gazetas, G. (2022). Seismic response of embedded foundations in liquefiable soils: Insights from centrifuge modeling and numerical simulations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *148*(3), Article 04021195. doi.org.