مجلة جامعة حمص

سلسلة علوم الهندسة المدنية والمعمارية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 9

1448 هـ - 2026 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص **المدير المسؤول عن المجلة**

أ. د. وليد حمادة	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الإنسانية**
د.نعيمة عجيب	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية**

د.محمد فراس رمضان	عضو هيئة التحرير
د. مضر سعود	عضو هيئة التحرير
د. ممدوح عبارة	عضو هيئة التحرير
د. موفق تلاوي	عضو هيئة التحرير
د. طلال رزوق	عضو هيئة التحرير
د. أحمد الجاعور	عضو هيئة التحرير
د. الياس خلف	عضو هيئة التحرير
د. روعة الفقس	عضو هيئة التحرير
د. محمد الجاسم	عضو هيئة التحرير
د. خليل الحسن	عضو هيئة التحرير
د. هيثم حسن	عضو هيئة التحرير
د. أحمد حاج موسى	عضو هيئة التحرير

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

سورية . حمص . جامعة حمص . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : 2138071 31 963 ++

. موقع الإنترنت : www.homs-univ.edu.sy

. البريد الالكتروني : journal.homs-univ.edu.sy

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
- طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
- **اذا كان الباحث طالب دراسات عليا:**

يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقته على النشر في المجلة.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:**

يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :**

يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.

- **اذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :**

يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):**

عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1- مقدمة

2- هدف البحث

3- مواد وطرق البحث

4- النتائج ومناقشتها .

5- الاستنتاجات والتوصيات .

6- المراجع.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسـبة لكليات (الآداب – الاقتصـاد– التربية – الحقوق – السياحة – التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):**
- عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1. مقدمة.
2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
3. أهداف البحث و أسئلته.
4. فرضيات البحث و حدوده.
5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
7. منهج البحث و إجراءاته.
8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
9. نتائج البحث.
10. مقترحات البحث إن وجدت.
11. قائمة المصادر والمراجع.

7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:

أ- قياس الورق 17.5×25 B5.

ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 – يمين 2.5- يسار 2.5 سم

ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8

ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20

ـ كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي ـ العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.

ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.

8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.

9- تقديم أي بحث للنشـر في المجلة يدل ضـمناً على عدم نشـره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة ـ الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة ـ سنة النشر ـ وتتبعها معترضة (–) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة ـ دار النشر وتتبعها فاصلة ـ الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة.

وفيما يلي مثال على ذلك:

–MAVRODEANUS, R1986– **Flame Spectroscopy**. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

ـــ بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة ـــ المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة ـــ أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة.

مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases **Clinical Psychiatry News** , Vol. 4. 20 – 60

ج. إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. **دفع رسم نشر (600) ل.س ستمئة ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.**
2. **دفع رسم نشر (2000) ل.س الفا ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .**
3. **دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .**
4. **دفع مبلغ (150) ل.س مئة وخمسون ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.**

المحتوى

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
دراسة دور العطالة للكتلة في الأساسات السطحية باستخدام الطاولة الاهتزازية	عناية علي د. علي العبد الله تركي طبق	30-11
تقوية الصفائح المعدنية العاملة مع الإطارات البيتونية المسلحة كجدران قص بعناصر التدعيم الأفقية والشاقولية	د. أسامة طراف	58-31
دور المرونة في تعزيز استدامة البناء التراثي والتكيُّف مع الاستخدامات الجديدة - نحو اقتصاد دائري مستدام	د. علا خيطو	94-59
"مساهمة في تطوير علاقة تحليلية لحساب مقاومة القص في الجوائز البيتونية المدعمة بالألياف الفولاذية باستخدام شبكة ذكاء اصطناعي ANN"	سعيد هاشم سعيد أ.د. أكرم صقور أ.د. غاندي جحجاح	118-95
الاستجابة الزلزالية للأساسات السطحية: تقييم التسييل الموضعي والهبوط باستخدام الطاولة الاهتزازية	عناية علي د. علي العبد الله تركي طبق	142-119

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.

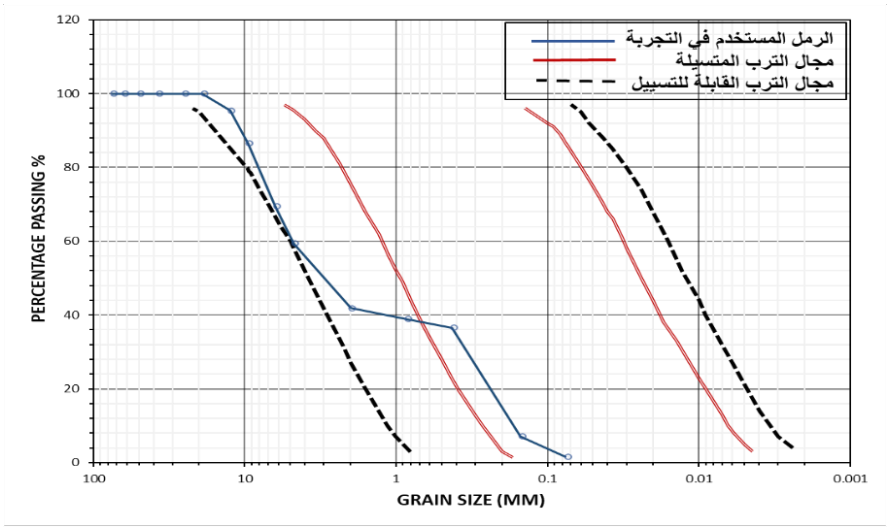
2-هدف البحث:

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.

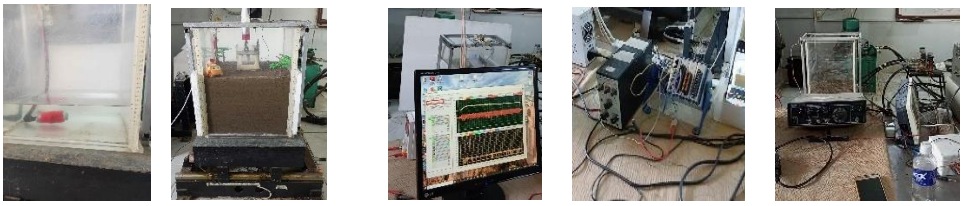
وبتطبيق القوانين حسب (Coduto, D. P. 2001) تم حساب الإجهاد الفعال الناتج عن وزن التربة كما يلي:

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

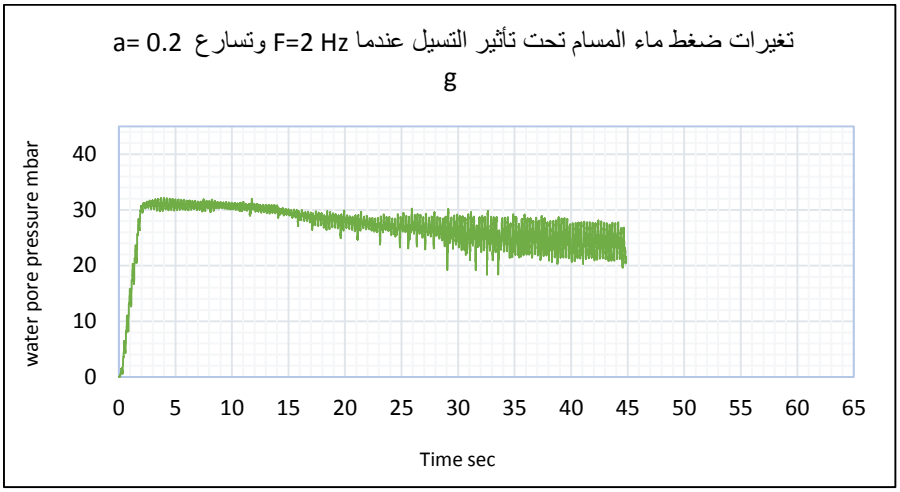
الضغط	t_{liq} (s)	N_{liq}	Δu (kPa)	ru	a_s (g)	d_v (mm)
السطح الحر	2.205	4.41	3.12	1.013	----	-----
1 kPa	4.03	8.06	1.822	0.587	0.217	0.592
2 kPa	2.89	5.78	1.487	0.462	0.089	4.074

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.

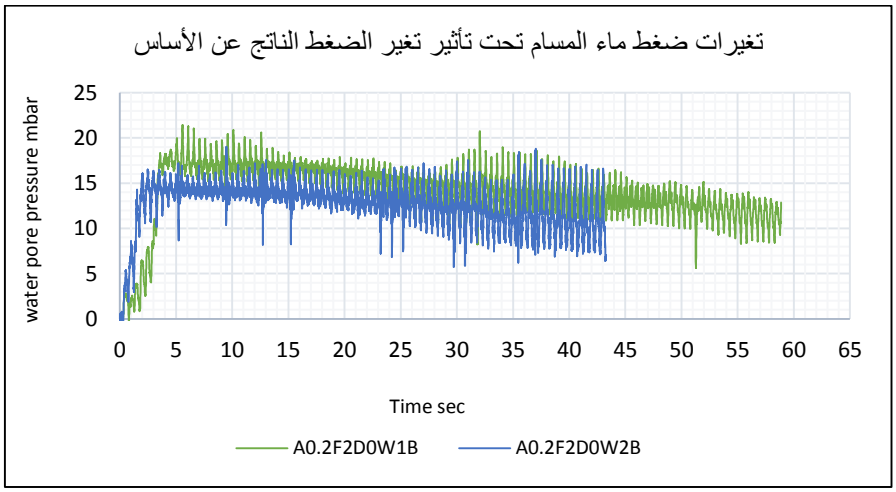
الجدول (3) يوضح قيم معاملات التسييل المختلفة وسلوك النظام

$\tau_{cyc}\ kpa$	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.

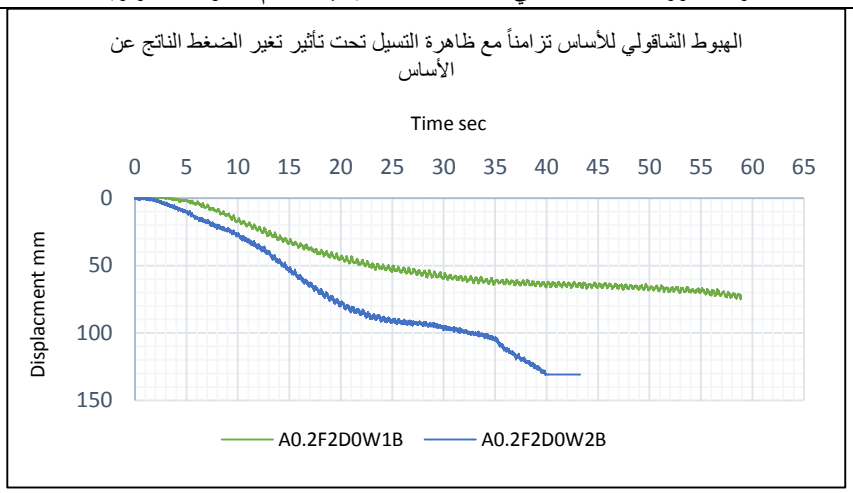


الشكل (3) نتائج الاختبار في حالة السطح الحر (بدون وجود أساس)

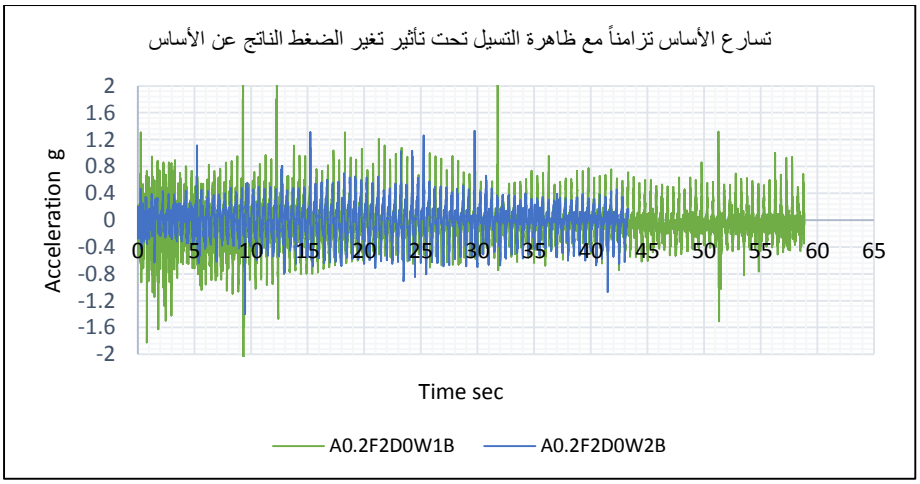


الشكل (4) يوضح تطور ضغط ماء المسام مع الزمن خلال الحركة الزلزالية حيث : A0.2F2D0W1B يعبر عن تطور ضغط ماء المسام في حال الضغط يساوي 1Kpa، A0.2F2D0W2B يعبر عن تطور ضغط ماء المسام في حال الضغط يساوي 2Kpa.

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.

تقوية الصفائح المعدنية العاملة مع الإطارات البيتونية المسلحة كجدران قص بعناصر التدعيم الأفقية والشاقولية

الملخص:

تعد الإطارات أحد أنواع الجمل الإنشائية لمقاومة الأحمال الزلزالية، يتم رفع كفاءة هذه الإطارات بطرق عدة حيث تعتبر إضافة صفائح معدنية ضمن مجاز الإطار لتعمل كجدران قص إحدى هذه الطرق.
يهدف هذا البحث لدراسة تأثير تقوية الصفائح المعدنية العاملة مع الإطارات البيتونية المسلحة كجدران قص بعناصر التدعيم الأفقية و الشاقولية. استعمل في الدراسة التحليل العددي باستخدام نظرية العناصر المحدودة (Finite Element Method–FEM) واعتماد التحليل اللاخطي والذي يأخذ بالاعتبار سلوك المادة اللاخطي وتأثير التشوهات الكبيرة (Geometrically and Materially Non–Linear Analysis, GMNLA). استخدمت في البحث طريقة الدفع الجانبي المتزايد (Pushover) لدراسة سلوك الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية المدعمة بعناصر التدعيم الأفقية و الشاقولية على مقاومة الأحمال الجانبية.
يبين البحث أن تقوية الصفائح المعدنية بعناصر التدعيم قد أدى لزيادة المقاومة بشكل ملحوظ بالإضافة لزيادة قدرة الجملة على تبديد الطاقة الزلزالية.

كلمات مفتاحيه: إطار بيتوني مسلح، صفائح معدنية كجدران قص، تحليل ستاتيكي لاخطي، تبديد الطاقة الزلزالية.

Strengthening of Steel Plate Shear Walls Integrated with Reinforced Concrete Frames Using Horizontal and Vertical Stiffening Elements

Abstract:

Structural frames are primary systems designed to resist seismic loads. The efficiency of these frames can be enhanced through various methods, one of which is the integration of steel plates within the frame span to function as Steel Plate Shear Walls (SPSWs).

This research aims to investigate the effect of strengthening these steel plates, when acting in conjunction with reinforced concrete frames (RCF), using horizontal and vertical Stiffening elements. The study employed numerical analysis based on the **Finite Element Method (FEM)**, adopting a **Geometrically and Materially Non-Linear Analysis (GMNLA)** to account for both material non-linearity and large deformation effects. Furthermore, the **Non-Linear Static Pushover Analysis** was utilized to evaluate the structural behavior and the lateral load capacity of the RC frames equipped with stiffened steel plates.

The results indicate that the application of Stiffening elements significantly increased the load-bearing capacity and enhanced the system's ability to dissipate seismic energy.

.

Keywords: Reinforced Concrete Frame, Steel Plate Shear Walls (SPSW), Non-Linear Static Analysis, Seismic Energy Dissipation.

1-مقدمة (Introduction).

تطور خلال العقدين الأخيرين استخدام جدران القص الفولاذية (SPSW) كنظام إنشائي فعّال لمقاومة القوى الجانبية التي يمكن أن يخضع لها المنشأ كحمولات الرياح والزلازل، إضافة لأنها تشكل حلاً اقتصادياً. تقاوم جدران القص الفولاذية قوى القص الطابقية الناتجة عن الحمولات الجانبية، بآلية رئيسية تتمثل بحقول الشد المائلة التي تتشكل في ألواح الملء في المرحلة اللاحقة لتحنيب هذه الصفائح **[2]** (post buckling). ويعتبر إضافة عناصر التدعيم الأفقية و الشاقولية لجدران القص المعدنية أحد الطرائق المتبعة لتحسين أداء عمل هذه الصفائح المعدنية لمقاومة الأحمال الزلزالية**[4]**.

2- هدف البحث.

يهدف البحث لدراسة تأثير استعمال الصفائح المعدنية ا كجدران قص (**SPSW**) لتقوية الجمل الإطارية البيتونية المسلحة باستخدام تحليل ستاتيكي لاخطي بطريقة الدفع الجانبي **[3]** (**Pushover Analysis**) يعتمد على برنامج **Abaqus 2026 (FD01)[6]**. لإطار بيتوني مسلح اعتمدت أبعاده و مقاطعه من دراسة تجريبية**[5]** لبيان تأثير إضافة عناصر التدعيم الأفقية و الشاقولية لجدران القص المعدنية و تأثير ذلك على سلوك الإطار المدعم.

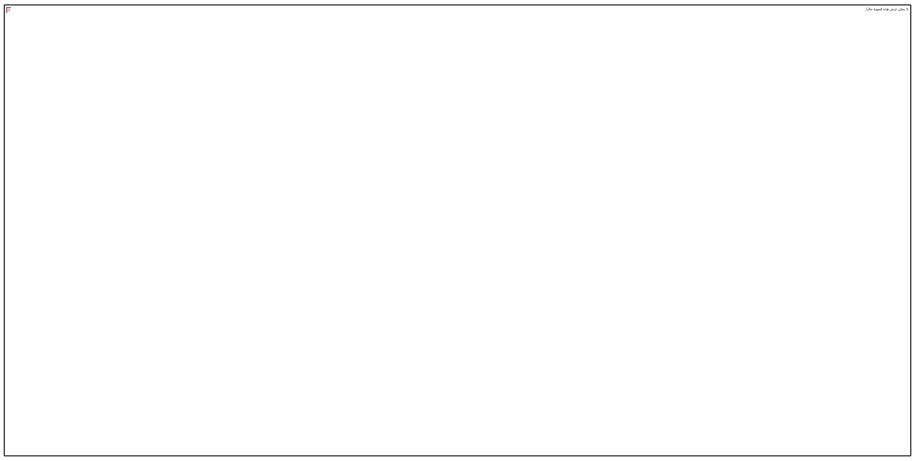
3- مواد وطرائق البحث.

3-1 توصيف الإطار المدروس:

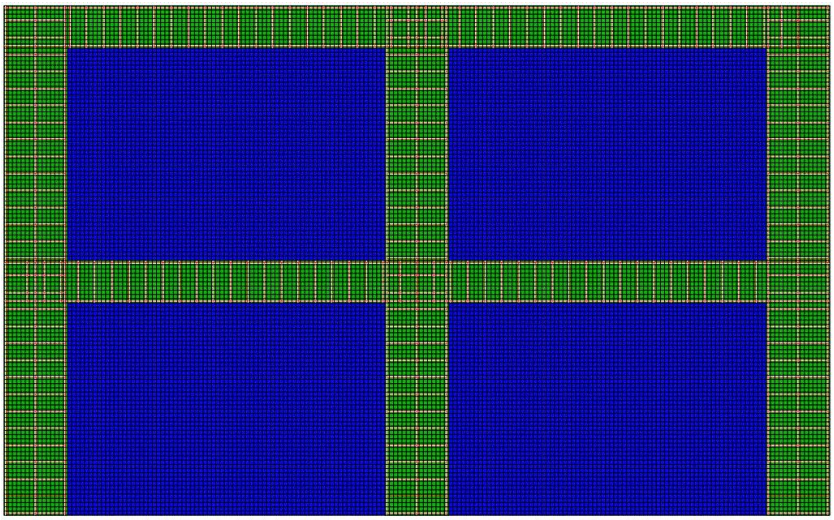
يبين الشكل (1) أبعاد النموذج المدروس المؤلف من طابقين و مجازين و موثوق في أسفل أعمدته بوثاقة تامة، فيه عطالة مقطع العمود أكبر من عطالة مقطع الجائز و مسلح باشتراطات الإطار المقاوم للعزوم وفق اشتراطات الكود**[1]**، الارتفاع الطابقي وعرض فتحة المجاز للإطار على الترتيب(**h=100 cm, b=150 cm**). كما يبين الشكل أبعاد مقطع العمود كما يلي **h_c=300 mm, b_c=300 mm**) مع قطر و عدد قضبان تسليحه الطولي و العرضي على الترتيب

(h_b=200 **mm** , b_b=300 **mm**) و يبين أبعاد مقطع الجائز كما يلي (**4T20,4T18**($\mu = 2.5\%$), **Ø8/8cm**) مع قطر و عدد قضبان تسليحه الطولي و العرضي على الترتيب (**2T18, Ø8/8cm**).

كما ويبين الشكل (2) الإطار المدروس المدعم بالصفائح المعدنية بسماكة (t_p=2 **mm**) بعد نمذجته في برنامج **Abaqus 2026 (FD01)** . الشروط المحيطية للصفائح المعدنية وثاقة تامة مع جسم الإطار البيتوني المسلح ومن الأسفل.



الشكل(1): أبعاد النموذج المدروس.



الشكل (2): الإطار المدروس المدعم بالصفائح المعدنية بعد نمذجته في برنامج(2026) Abaqus.

2-3 توصيف الإطار بعد إضافة عناصر التدعيم(Stiffening elements):

توصيف عناصر التدعيم.

A. عدد عناصر التدعيم.

تم دراسة حالتين كما يلي:

a) مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة معدنية **(S-2)**.

b) مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية لكل صفيحة معدنية **(S-5)**.

B. أبعاد المدعمات.

اعتمدت أبعاد عناصر التدعيم المعدنية، العرض والسماكة على الترتيب (b_s=20mm,t_s=10mm).

C. نمذجة عناصر التقوية الإضافية.

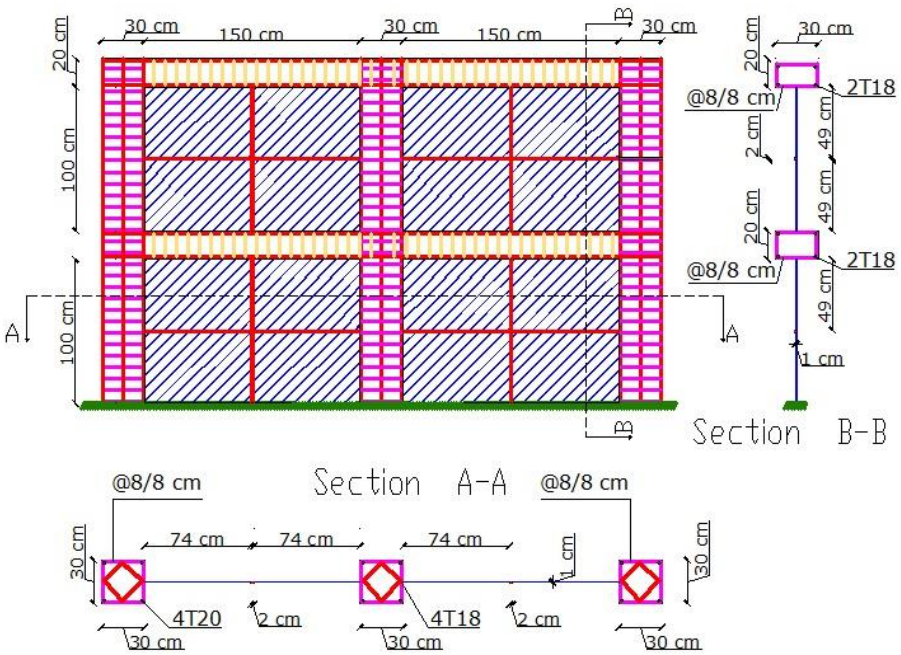
تمت نمذجة المدعمات المعدنية (Stiffeners) باستخدام العنصر (S4R).

D. طريقة تثبيت عناصر التقوية الإضافية.

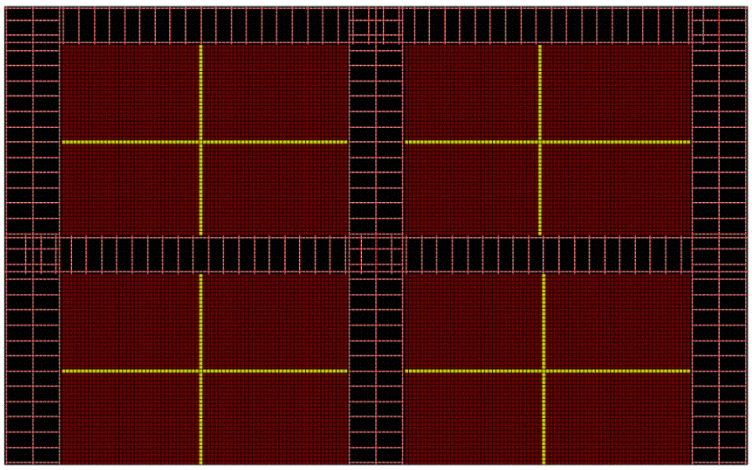
تم استعمال اللحام لتثبيت عناصر التدعيم على الصفيحة المعدنية.

E. تموضع عناصر التقوية الإضافية.

يبين الشكل (3) نموذج الإطار المدروس مع الصفائح المعدنية بسماكة **(t_p=2mm)** المدعمة بالمدعمات المعدنية لحالة مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة معدنية**(S-2)** موضح عليه أبعاد عناصر التقوية الإضافية وتموضعها وأبعاد المقاطع. الشروط المحيطية للمدعمة المعدنية، وثاقة تامة مع الصفيحة ومع الجوائز عند الأطراف. كما يبين الشكل (4) الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية المدعمة بعناصر التقوية الإضافية بعد النمذجة في برنامج (2026) Abaqus.

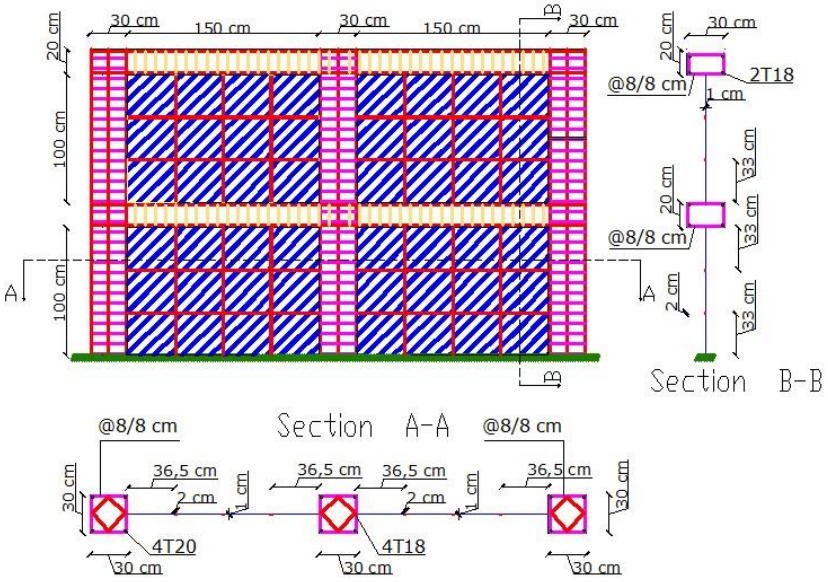


الشكل (3): الإطار مع الصفائح المعدنية المدعمة بالمدعمات، مدعمة أفقية والأخرى شاقولية (t_p **=2 mm**).

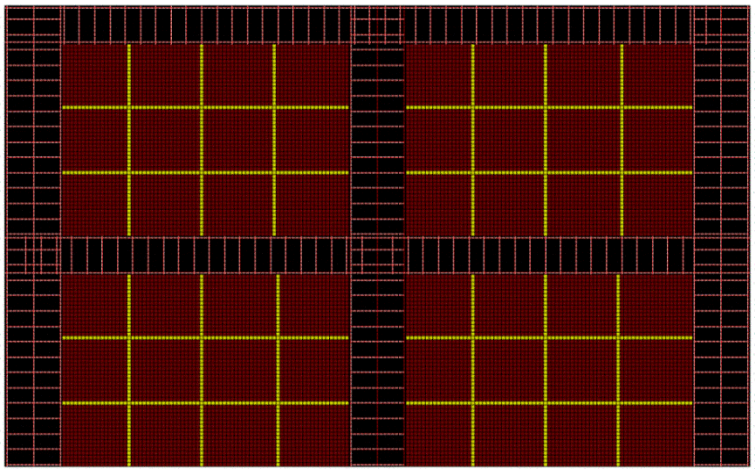


الشكل (4): الإطار المدعم بالصفائح المعدنية(**tp= 2 mm**) وبعناصر التقوية الإضافية المعدنية بعد نمذجته في برنامج **Abaqus (2026)**

يبين الشكل (5) نموذج الإطار المدروس مع الصفائح المعدنية بسماكة (t_p=2mm) المدعمة بالمدعمات المعدنية لحالة مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية لكل صفيحة معدنية(S-5) موضح عليه أبعاد المدعمات وتموضعها وأبعاد المقاطع. الشروط المحيطية للمدعمة المعدنية، وثاقة تامة مع الصفيحة ومع الجوائز عند الأطراف. كما يبين الشكل (6) الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية المدعمة بعناصر التدعيم بعد النمذجة في برنامج Abaqus (2026).



الشكل (5): الإطار مع الصفائح المدعمة بالمدعمات، مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية(t_p = 2 mm).



الشكل (6): الإطار المدعم بالصفائح المعدنية والمدعمات، مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية بعد نمذجته في برنامج**Abaqus (2026).**

3-3 توصيف المواد المستخدمة:

a) الخرسانة:

اعتمدت المقاومة المتوسطة للبيتون على الضغط مساوية للقيمة **(f_{cm}=25 Mpa)** واعتمد معامل مرونة البيتون مساوٍ للقيمة **(E_{cm} = 30 Gpa)**.

b) فولاذ تسليح الأعمدة والجوائز:

اعتمد إجهاد خضوع فولاذ التسليح الطولي للأعمدة والجوائز **(f_y=400 MPa)** ومعامل المرونة مساوٍ للقيمة **(E_s=200GPa)**، واعتمد إجهاد خضوع فولاذ التسليح العرضي للأعمدة والجوائز **(f_y=240 Mpa)** ومعامل المرونة مساوٍ للقيمة**(E_s=200GPa)**.

c) فولاذ الصفيحة المعدنية:

اعتمد إجهاد خضوع فولاذ الصفيحة المعدنية **(fy=225 MPa)** ومعامل المرونة مساوٍ للقيمة **(Es=200GPa)**.

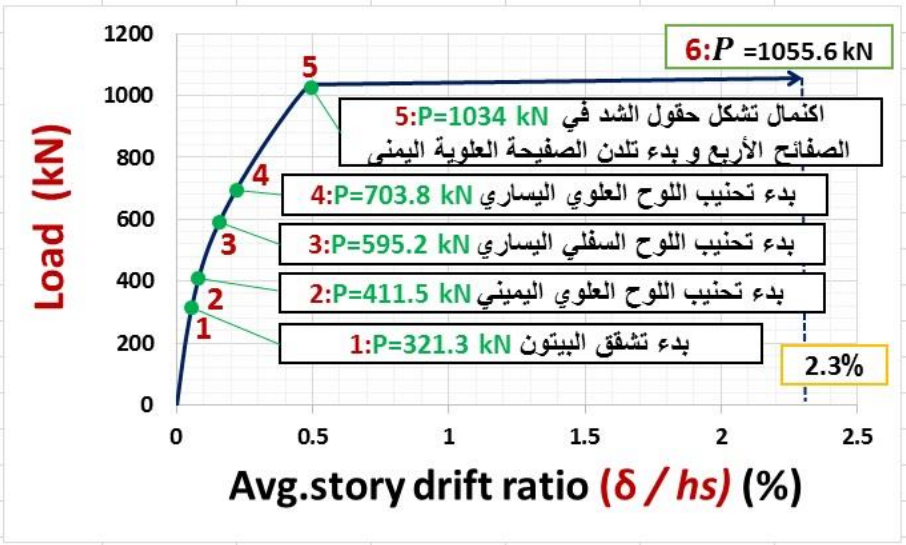
d) فولاذ عناصر التقوية و التدعيم المعدنية:

اعتمد إجهاد خضوع فولاذ عناصر التقوية و التدعيم المعدنية **(f_y=300MPa)** ومعامل المرونة مساوٍ للقيمة **(Es=200GPa)**.

تم التحميل بتطبيق انتقال أفقي في أعلى الإطار و استنتاج مخطط القوة الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية.

4- النتائج و مناقشتها.

يبين الشكل (7) مخطط القوة–الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية **(Avg.story drift ratio%)** يتميز هذا المخطط بست نقاط تشرح المراحل التي مر بها نموذج الإطار مع الصفائح المعدنية.

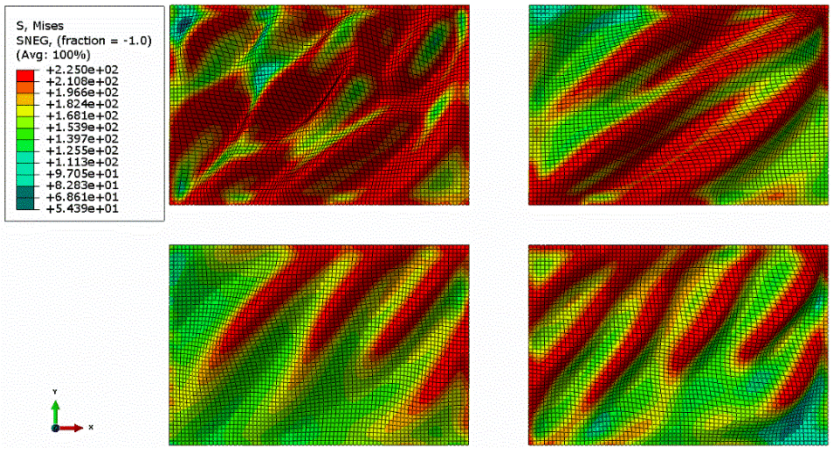


الشكل (7): مخطط قوة القص–الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية (**Avg.story drift ratio%**) للنموذج (**SPSW**) t_p (=2 mm).

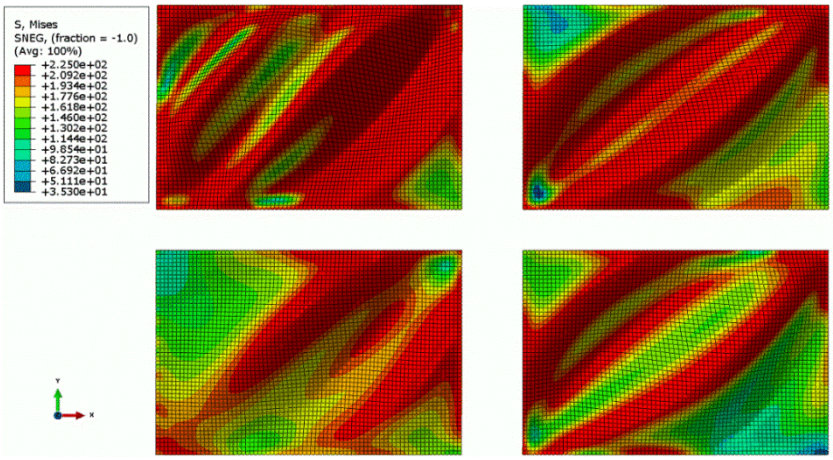
يبين الشكل (8) الشكل المتشوه عند النقطة المميزة (6) مع إجهاد (**Von Mises**) و قد وصل لقيمة إجهاد الخضوع ($f_y = 225\ MPa$) بالألواح الأربعة (t_p =2 mm)، وتنتشر نقاط الخضوع في جسم الصفائح المعدنية مبتعدة عن مراكز حقول الشد.

4-1 زيادة سماكة الصفيحة المعدنية على مخطط الحمولة الانتقال.

تم زيادة سماكة الصفيحة المعدنية لتصبح (t_p =4 mm) و يبين الشكل (9) الشكل المتشوه مع إجهاد فون ميسس (**Von Mises**)، كما و يظهر أن اللدونة تنتشر مبتعدة عن مراكز حقول الشد في جسم الصفائح المعدنية، حيث وصل إجهاد (Von–Mises) في الصفائح المعدنية الأربع لقيمة إجهاد الخضوع (fy = 225 MPa) وانخفض عدد مودات التحنيب بزيادة سماكة الصفائح المعدنية.



الشكل (8): إجهاد فون ميسس(**Von Mises**) في الصفائح للنموذج (**SPSW**) عند النقطة المميزة (**6**).



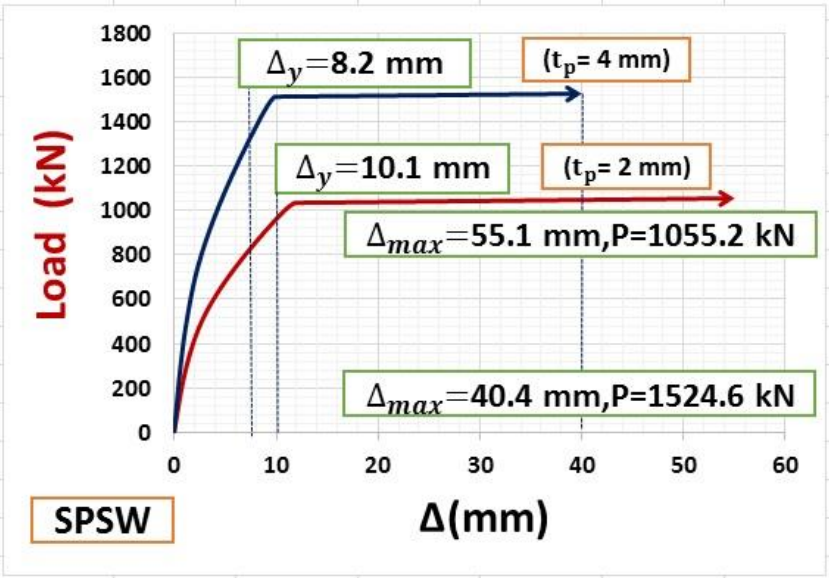
الشكل (9): الشكل المتشوه **(Deformed-shape)** مع إجهاد الخضوع فون ميسس **(Von-Mises)** لجملة الصفائح المعدنية فقط **(t_p= 4 mm)**.

يبين الشكل (10) مخطط قوة القص–الانتقال، فيه المحور الشاقولي هو قوة القص المطبقة Load– (kN) والمحور الأفقي يمثل الانتقال في أعلى الإطار(Δ–mm)، تمت فيه المقارنة بين حالتين للنموذج (**SPSW**) بسماكتين مختلفتين للصفائح المعدنية كما يلي:

a) الإطار البيتوني المسلح المدعم بالصفائح المعدنية بسماكة (**t_p= 2 mm**).

b) الإطار البيتوني المسلح المدعم بالصفائح المعدنية بسماكة (**t_p= 4 mm**).

يبين الشكل أن الإطار البيتوني المسلح المدعم بالصفائح المعدنية بسماكة (t_p= 2 mm) أبدى قدرة تحمل (P=1055.2 kN) مع صلابة متوسطة نسبياً، ومطاوعة انتقال جيدة وصلت للقيمة ($\mu = \frac{\Delta_{Max}}{\Delta_y} = \frac{55.1}{10.1} = 5.45$)، أما الإطار البيتوني المسلح المدعم بالصفائح المعدنية بسماكة t_p= 4 (mm) أبدى قدرة تحمل مرتفعة (P=1524.6 kN) مع صلابة عالية نسبياً، ومطاوعة انتقال متوسطة وصلت للقيمة ($\mu = \frac{\Delta_{Max}}{\Delta_y} = \frac{40.4}{8.2} = 4.93$).



الشكل (10): مخطط القوة-الانتقال مقارنة بين حالتين للنموذج (SPSW) وبسماكتين للصفائح المعدنية (t_p= 2 mm) (t_p= 4 mm).

4-1-1 تبديد الطاقة الزلزالية:

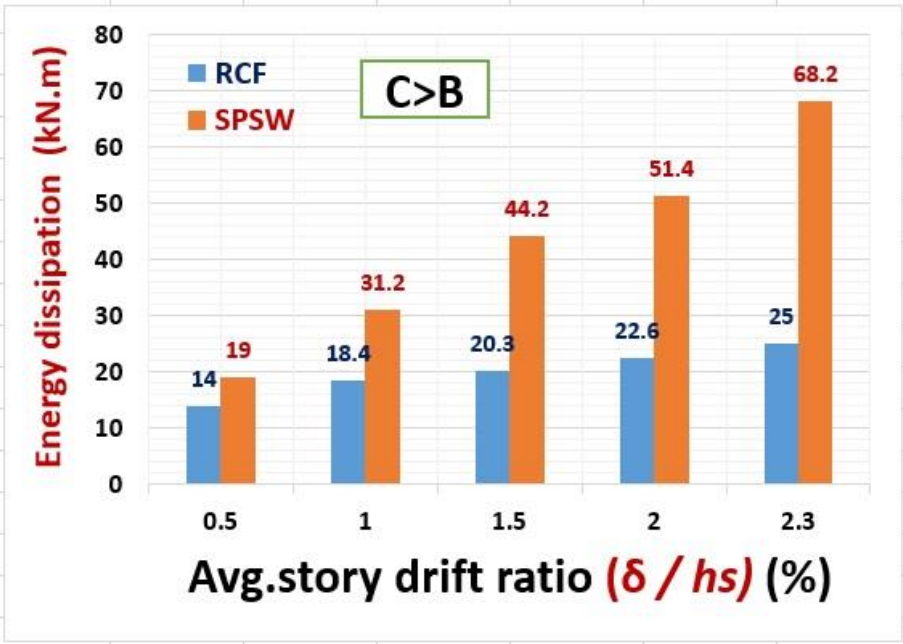
a) حالة النموذج (SPSW) (t_p= 2 mm).

يبين الشكل (11) مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (RCF) و النموذج (SPSW)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية(Avg-story drift ratio%) والمحور الشاقولي يمثل قيمة الطاقة المبددة(Energy dissipation kN.m).

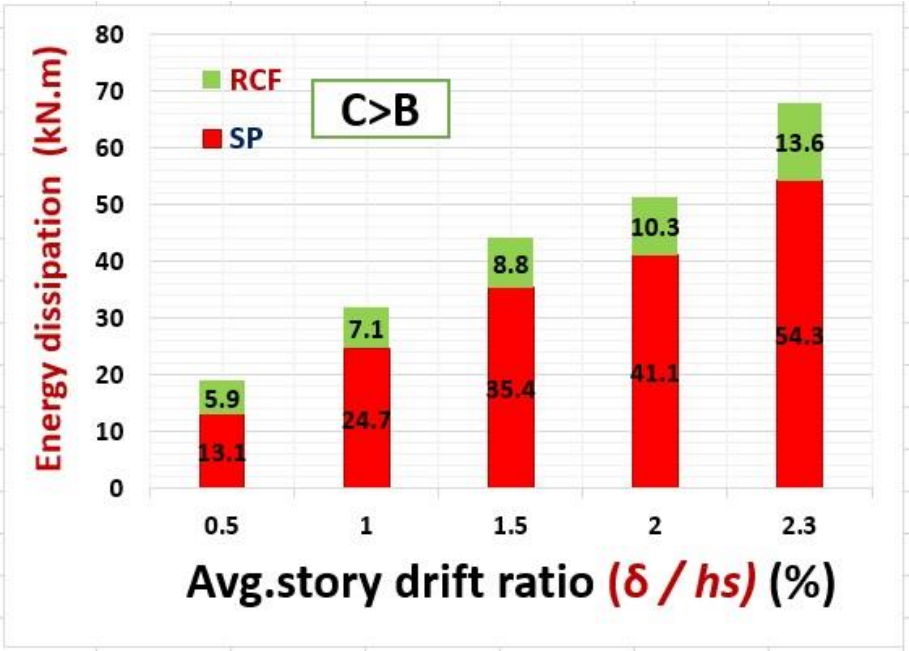
فيبين أنه عند (**Avg-story drift ratio%=0.5**) كانت الطاقة المبددة (**E=14 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=19 KN.m**) للنموذج (**SPSW**)، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة (**Avg-story drift ratio%=1.5**) أصبحت الطاقة المبددة (**E=20.3 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=44.2 KN.m**) للنموذج (**SPSW**)، ومع انتهاء التحميل عند (**Avg-story drift ratio%=2.3**) وصلت الطاقة المبددة للقيمة (**E=25 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=68.2 KN.m**) للنموذج (**SPSW**). **إذاً عند استعمال الصفائح المعدنية كجدران قص مع الإطارات البيتونية المسلحة، يتحسن الأداء الزلزالي للجملة الجديدة عبر تبديد أكبر للطاقة الزلزالية تجاوز الضعف (مثلين ونصف).**

يبين الشكل (12) مقارنة بين الطاقة المبددة في الإطار البيتوني المسلح و في الصفائح المعدنية بالنموذج (**SPSW**)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية (**Avg-story drift ratio%**) والمحور الشاقولي يمثل الطاقة المبددة(**Energy dissipation kN.m**).

فيبين أنه عند (**Avg-story drift ratio%=0.5**) كانت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=5.9 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح و(**E=13.1 KN.m**) في الصفائح المعدنية، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة (**Avg-story drift ratio%=1.5**) أصبحت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=8.8 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح و(**E=35.4 KN.m**) في الصفائح المعدنية، ومع انتهاء التحميل عند (**Avg-story drift ratio%=2.3**) وصلت الطاقة المبددة للقيمة (**E=13.6 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح وللقيمة (**E=54.3 KN.m**) في الصفائح المعدنية. **وهذا يشير ويدل أن استعمال الصفائح المعدنية كجدران قص مع الإطارات البيتونية المسلحة، يركز الضرر الناتج عن تبديد الطاقة في الصفائح المعدنية، وينخفض الضرر في الجملة الإطارية البيتونية المسلحة.**



الشكل (11) : مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (**RCF**) و النموذج (**SPSW**)(**t_p= 2 mm**).



الشكل (12): مقارنة الطاقة المبددة بين الإطار البيتوني المسلح والصفائح المعدنية في النموذج (**SPSW**). (t_p= 2 mm).

b) حالة النموذج (SPSW) (t_p= 4 mm).

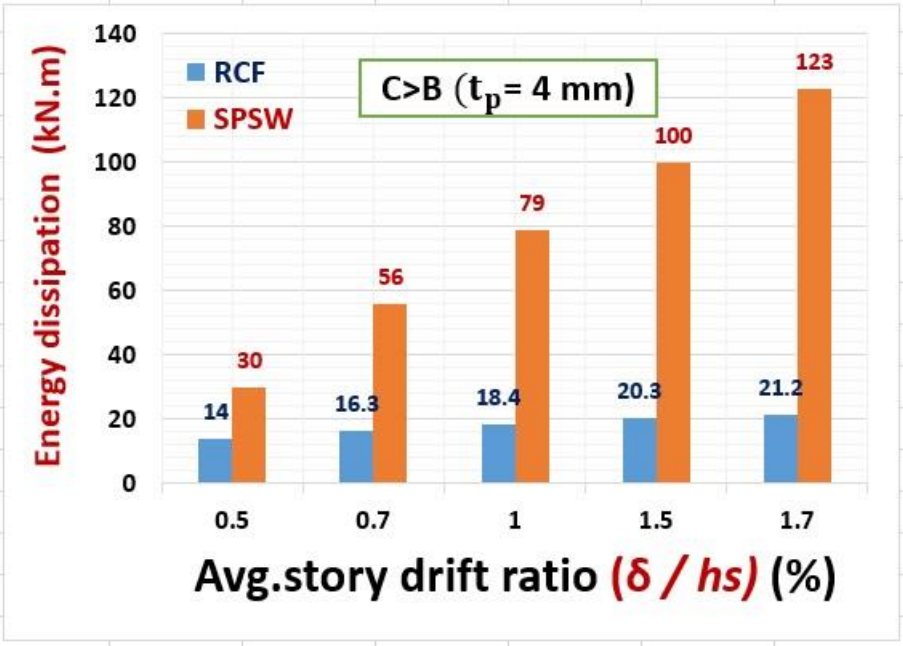
يبين الشكل (13) مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (**RCF**) و النموذج (**SPSW**)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية(**Avg-story drift ratio%**) والمحور الشاقولي يمثل قيمة الطاقة المبددة(**Energy dissipation kN.m**).

فيبين أنه عند (**Avg-story drift ratio%=0.5**) كانت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=14 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=30 KN.m**) للنموذج (**SPSW**)، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة (**Avg-story drift ratio%=1**) أصبحت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=18.4 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=79 KN.m**) للنموذج (**SPSW**)، ومع انتهاء التحميل عند (**Avg-story drift ratio%=1.7**) وصلت الطاقة المبددة (**E=21.2 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=123 KN.m**) للنموذج (**SPSW**).

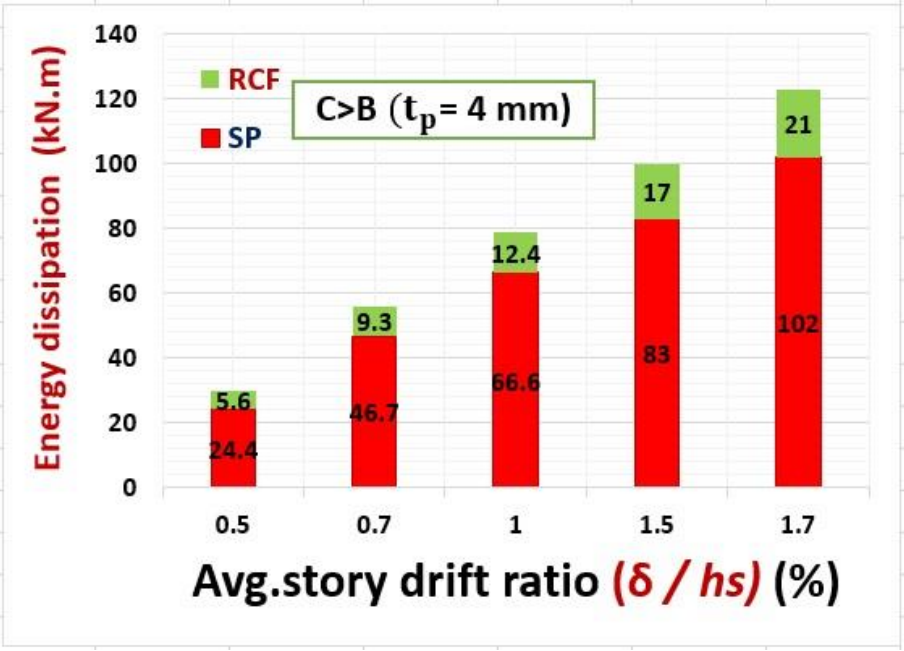
يبين الشكل (14) مقارنة بين الطاقة المبددة في الإطار البيتوني المسلح و في الصفائح المعدنية بالنموذج (**SPSW**)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية (**Avg-story drift ratio%**) والمحور الشاقولي يمثل الطاقة المبددة(**Energy dissipation kN.m**).

فيبين أنه عند (**Avg-story drift ratio%=0.5**) كانت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=5.6 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح و(**E=24.4 KN.m**) في الصفائح المعدنية، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة (**Avg-story drift ratio%=1**) أصبحت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=12.4 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح و(**E=66.6 KN.m**) في الصفائح المعدنية، ومع انتهاء التحميل عند (**Avg-story drift ratio%=1.7**) وصلت الطاقة المبددة للقيمة (**E=21 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح وللقيمة (**E=102 KN.m**) في الصفائح المعدنية.

إذاً عند زيادة سماكة الصفيحة لتصبح (t_p= 4 mm) **في النموذج (SPSW) ترتفع الطاقة المبددة خمسة أمثال إضافية عن الطاقة المبددة في النموذج (RCF)، ويتركز الضرر بنسبة كبيرة في الصفائح المعدنية، ما يقلل الضرر الحاصل في جسم الجملة الإطارية البيتونية المسلحة.**



الشكل (13): مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (**RCF**) و النموذج (**SPSW**) (t_p= 4 mm).



الشكل (14): مقارنة الطاقة المبددة بين الإطار البيتوني المسلح و الصفائح المعدنية في النموذج (**SPSW**) (t_p= 4 mm).

4-2 تأثير تقوية صفيحة الملء بعناصر التدعيم الأفقية و الشاقولية على سلوك (SPSW).

يبين الشكل (15) مخطط القوة–الانتقال، فيه المحور الشاقولي يعبر عن قوة القص المطبقة Load–(kN) والمحور الأفقي يمثل الانتقال في أعلى الإطار(Δ–mm)، تمت فيه المقارنة بين حالتين للنموذج (SPSW) كما يلي:

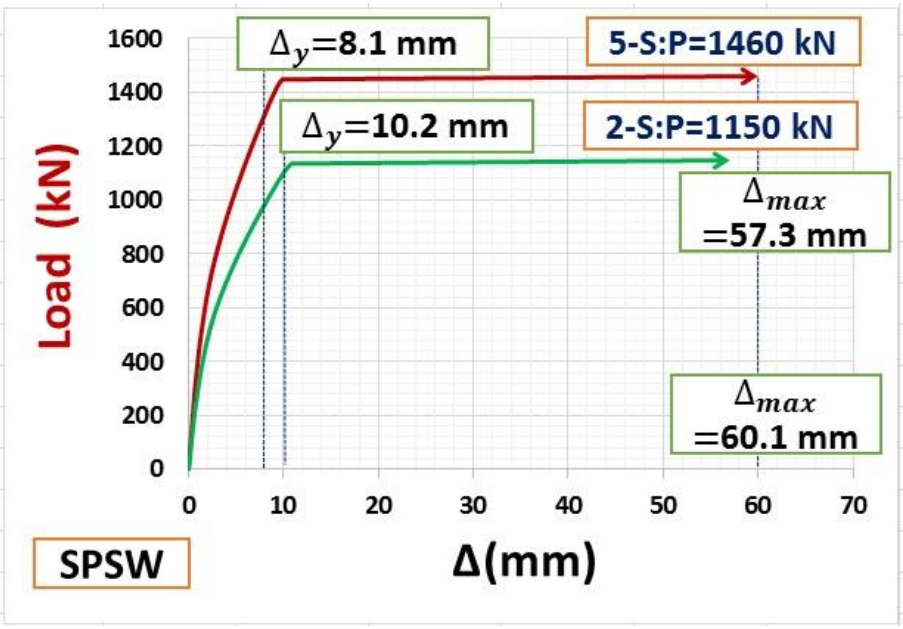
a) مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة معدنية(**S–2**).

b) مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية لكل صفيحة معدنية(**S–5**).

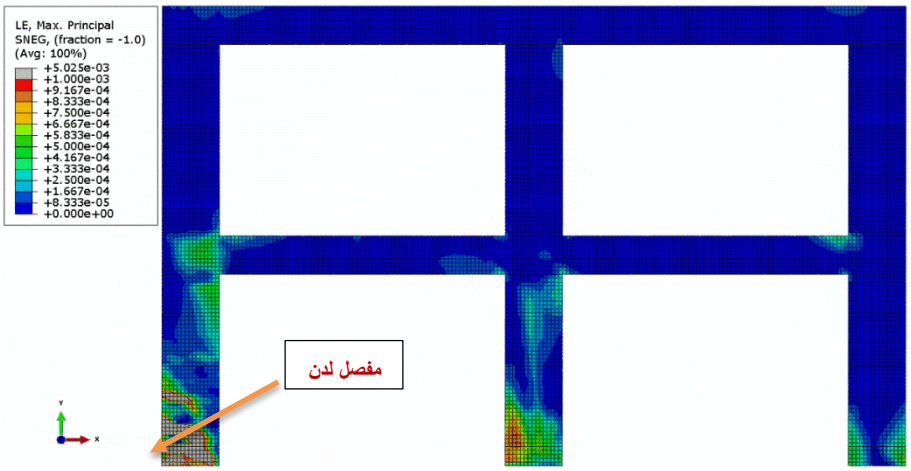
يبين الشكل أن الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية المدعمة بالمدعمات المعدنية (مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة) أبدى قدرة تحمل وصلت للقيمة (P=1150 kN) مع صلابة متوسطة نسبياً، ومطاوعة انتقال عالية نسبياً وصلت للقيمة ($\mu = \frac{\Delta_{Max}}{\Delta_y} = \frac{57.3}{10.2} = 5.62$).

فبعد بدء التحميل و تزايد الحمولة المطبقة يبدأ البيتون بالتشقق في أسفل العمود الأيسر ومع تزايد التحميل تنتشر التشققات في البيتون لتصل لمنتصف ارتفاع العمود الأيسر للطابق الأول ويكتمل تشكل حقول الشد في الصفائح الأربع.

وبنهاية التحميل تتزايد التشققات في البيتون ويتشكل مفصل لدن في أسفل العمود الأيسر، وتنتشر التشققات لتظهر بداية تشكل مفصل لدن في أسفل العمود الوسطي كما يوضح الشكل (16).

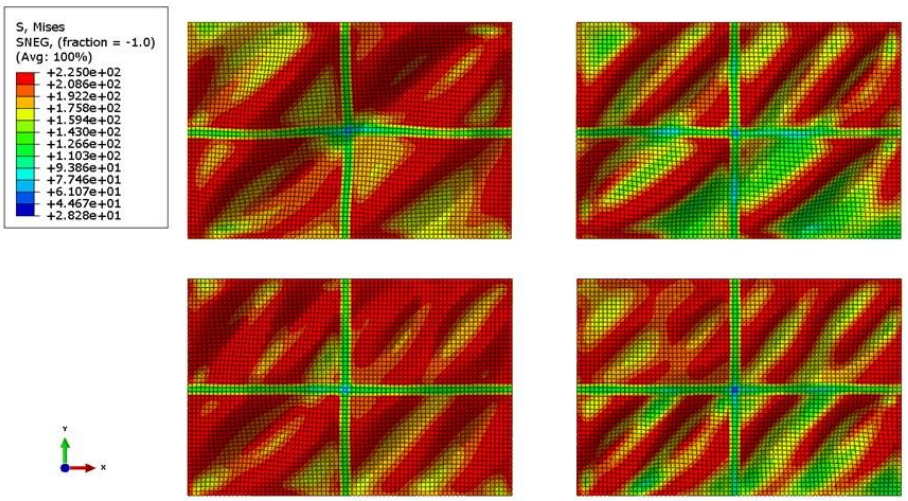


الشكل (15): مخطط قوة القص–الانتقال للنموذج (**SPSW**) مع المدعمات المعدنية(**S–2**) (**S–5**).



الشكل (16): تشكل مفصل لدن في أسفل العمود الأيسر، وبداية تشكل مفصل لدن في أسفل العمود الوسطي.

وتنتشر اللدونة مبتعدة عن مراكز حقول الشد في جسم الصفائح المعدنية، حيث وصل إجهاد فون ميسس في الصفائح المعدنية الأربع لقيمة إجهاد الخضوع (fy = 225 MPa) ما يبينه الشكل (17) .

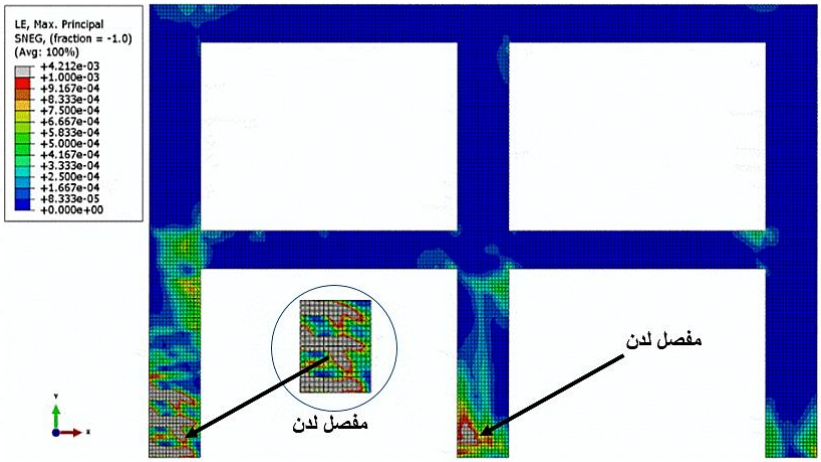


الشكل (17): الشكل المتشوه مع إجهاد الخضوع فون ميسس لجملة الصفائح المعدنية فقط **(t_p= 2 mm)**
(مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة)(S-2) .

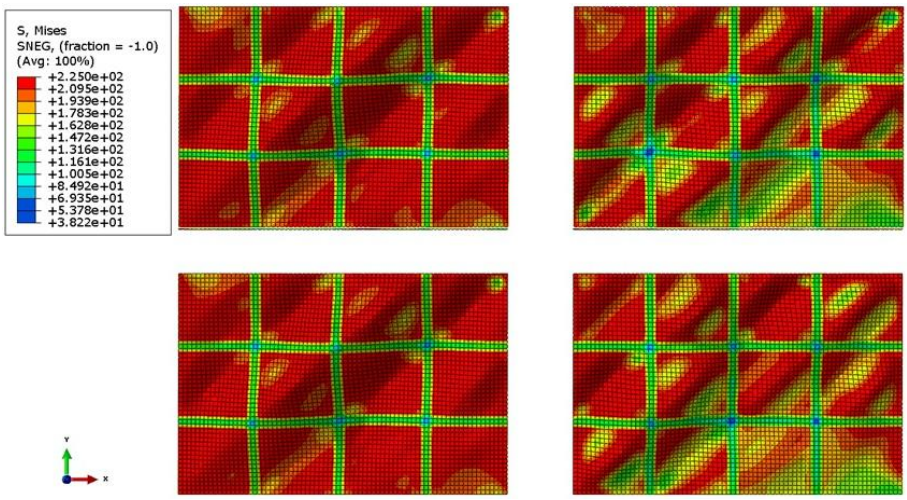
ويبين أيضاً الشكل (15) أن الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية المدعمة بالمدعمات المعدنية **(مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية لكل صفيحة معدنية)** أبدى قدرة تحمل أعلى من حالة

المدعمتين فوصلت للقيمة (**P=1460 kN**) مع صلابة أكبر، ومطاوعة انتقال أفضل ارتفعت للقيمة ($\mu = \frac{\Delta_{Max}}{\Delta_y} = \frac{60.1}{8.1} = 7.42$).

فبعد بدء التحميل و تزايد الحمولة المطبقة يبدأ البيتون بالتشقق في أسفل العمود، ومع تزايد التحميل تنتشر التشققات في البيتون على ارتفاع العمود الأيسر للطابق الأول ويكتمل تشكل حقول الشد في الصفائح المعدنية الأربع، وبنهاية التحميل تتزايد التشققات في البيتون ويتشكل مفصل لدن في أسفل العمود الأيسر، ويتوسع انتشار التشققات ليتشكل مفصل لدن في أسفل العمود الوسطي للإطار كما يوضح الشكل (18)، وتنتشر نقاط الخضوع مبتعدة عن مراكز حقول الشد في جسم الصفائح المعدنية لتغطي تقريباً (95%) من جسم الصفائح المعدنية، حيث وصل إجهاد فون ميسس في الصفائح المعدنية الأربع لقيمة إجهاد الخضوع (**fy = 225 MPa**) ما يبينه الشكل (19).



الشكل (18): تشكل مفصل لدن في أسفل العمود الأيسر، وتطور مفصل لدن في أسفل العمود الوسطي.



الشكل (19): الشكل المتشوه مع إجهاد الخضوع فون ميسس لجملة الصفائح المعدنية فقط (t_p= 2 mm) (**مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية**)(**S-5**) .

4-2-1 تبديد الطاقة الزلزالية:

a) مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة معدنية(S-2).

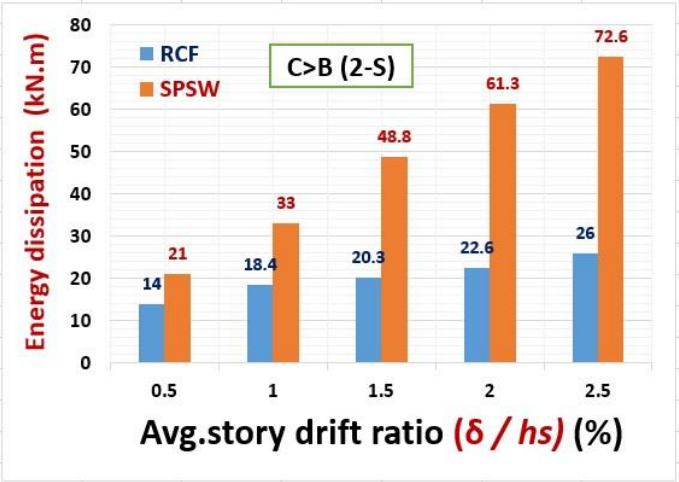
يبين الشكل (20) مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (**RCF**) و النموذج (**SPSW2**)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية(Avg-story drift ratio%) والمحور الشاقولي يمثل قيمة الطاقة المبددة(Energy dissipation kN.m).

فيبين أنه عند القيمة (Avg-story drift ratio%=0.5) كانت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=14 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=21 KN.m**) للنموذج (**SPSW**)، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة (Avg-story drift ratio%=1.5) أصبحت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=20.3 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=48.8 KN.m**) للنموذج (**SPSW**)، ومع انتهاء التحميل عند (Avg-story drift ratio%=2.5) وصلت الطاقة المبددة للقيمة (E=26 KN.m) للنموذج (**RCF**) و(**E=72.6 KN.m**) للنموذج (**SPSW**).

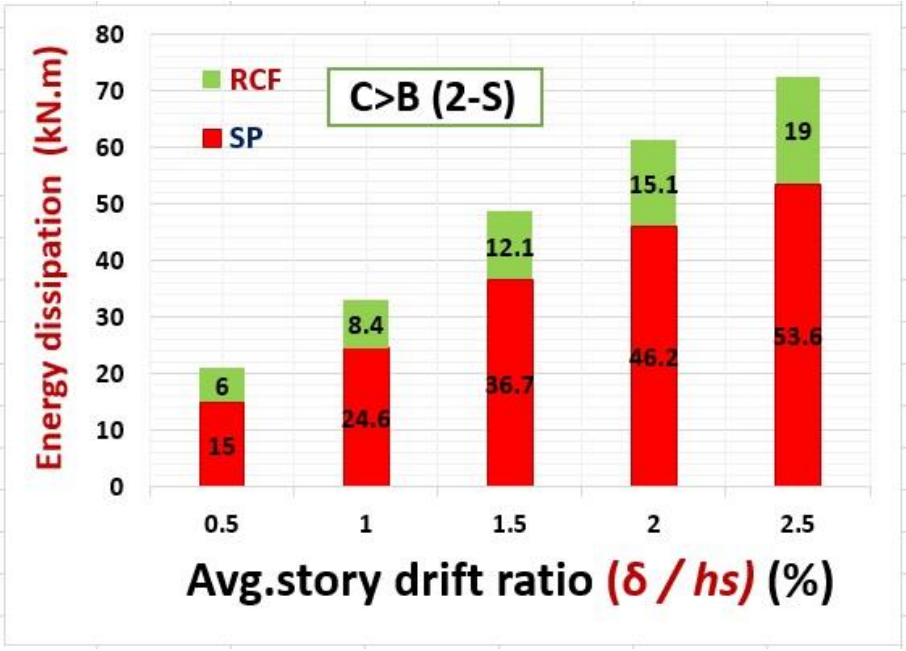
يبين الشكل (21) مقارنة بين الطاقة المبددة في الإطار البيتوني المسلح و في الصفائح المعدنية بالنموذج (**SPSW2**) (مدعمة أفقية و الأخرى الشاقولية)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية

كنسبة وسطية(Avg–story drift ratio%) والمحور الشاقولي يمثل قيمة الطاقة المبددة Energy). dissipation kN.m)

فيبين أنه عند (Avg–story drift ratio%=0.5) كانت الطاقة المبددة مساوية (**E=6 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح و(E=15 KN.m) في الصفائح المعدنية، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة (Avg–story drift ratio%=1.5) أصبحت الطاقة المبددة مساوية (**E=12.1 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح و(**E=36.7 KN.m**) في الصفائح المعدنية، ومع انتهاء التحميل عند (Avg–story drift ratio%=2.5) وصلت الطاقة المبددة للقيمة (**E=19 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح وللقيمة (**E=53.6 KN.m**) في الصفائح المعدنية.



الشكل (20): مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (**RCF**) و النموذج (**SPSW**) (**t_p= 2 mm**) (**مدعمة أفقية و الأخرى شاقولية**)(**S–2**) .

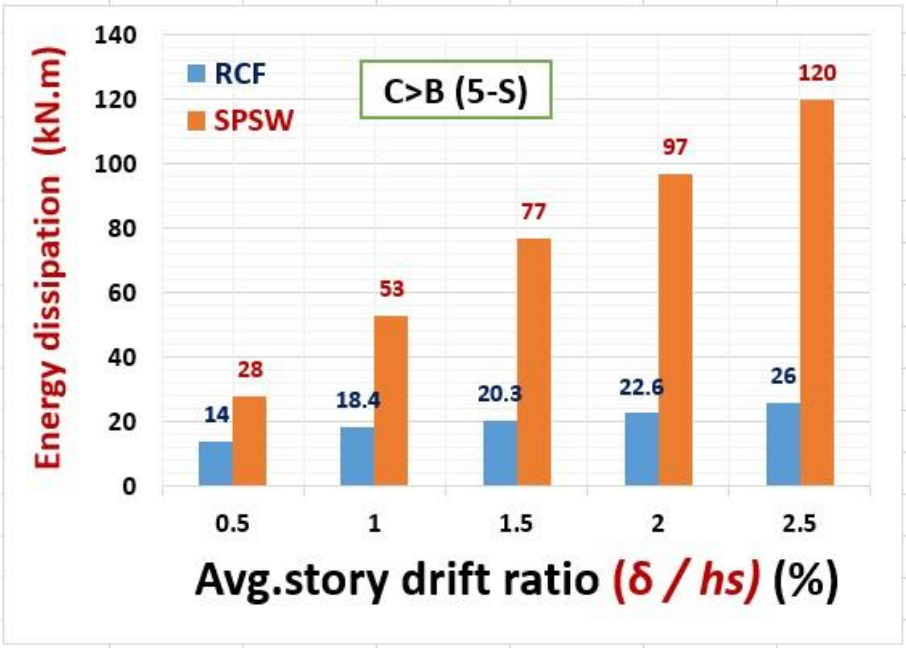


الشكل (21): مقارنة الطاقة المبددة بين الإطار البيتوني المسلح و الصفائح المعدنية في النموذج **(SPSW)** **(t_p= 2 mm)** **(مدعمة أفقية و الأخرى شاقولية)(2-S)** .

b) مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية لكل صفيحة معدنية(5-S).

يبين الشكل (22) مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج **(RCF)** و النموذج **(SPSW5)**، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية**(Avg-story drift ratio%)** والمحور الشاقولي يمثل قيمة الطاقة المبددة**(Energy dissipation kN.m)**.

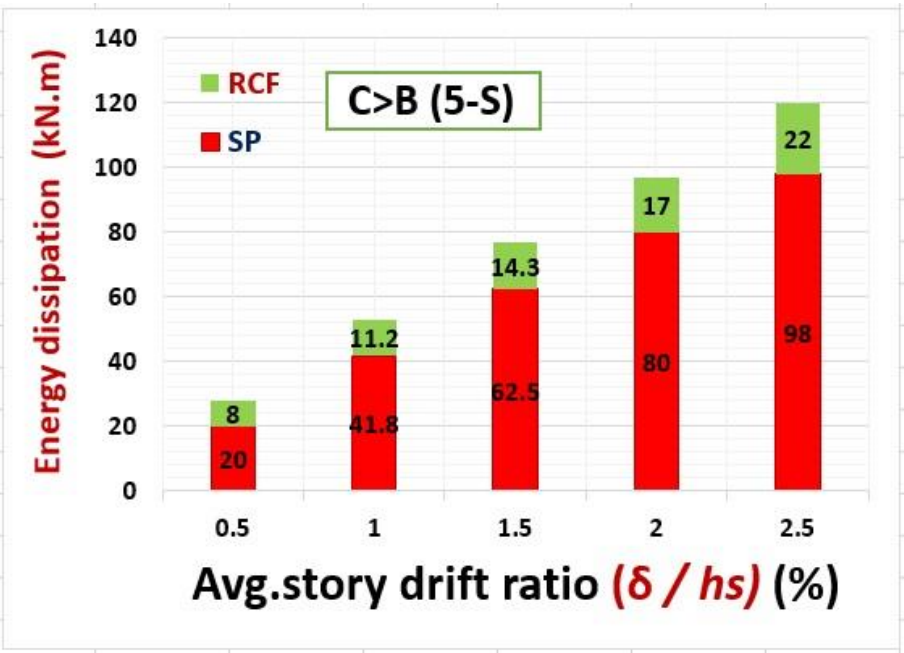
فيبين أنه عند **(Avg-story drift ratio%=0.5)** كانت الطاقة المبددة مساوية للقيمة **(E=14 KN.m)** للنموذج **(RCF)** و**(E=28 KN.m)** للنموذج **(SPSW)**، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة **(Avg-story drift ratio%=1.5)** أصبحت الطاقة المبددة مساوية للقيمة **(E=20.3 KN.m)** للنموذج **(RCF)** و**(E=77 KN.m)** للنموذج **(SPSW)**، ومع انتهاء التحميل عند **(Avg-story drift ratio%=2.5)** وصلت الطاقة المبددة للقيمة التالية **(E=26 KN.m)** للنموذج **(RCF)** و**(E=120 KN.m)** للنموذج **(SPSW)**.



الشكل (22) : مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (RCF) و النموذج (SPSW)(t_p = 2 mm) (**مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية**)(S-5) .

يبين الشكل (23) مقارنة بين الطاقة المبددة في الإطار البيتوني المسلح و في الصفائح المعدنية بالنموذج (SPSW5)**المدعم بالمدعمات الأفقية و الشاقولية**، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية(**Avg-story drift ratio%**) والمحور الشاقولي يمثل قيمة الطاقة المبددة(**Energy dissipation kN.m**).

فيبين أنه عند (**Avg-story drift ratio%=0.5**) كانت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=8 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح و(**E=20 KN.m**) في الصفائح المعدنية، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة (**Avg-story drift ratio%=1.5**) أصبحت الطاقة المبددة مساوية للقيمة (**E=14.3 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح و(**E=62.5 KN.m**) في الصفائح المعدنية، ومع انتهاء التحميل عند (**Avg-story drift ratio%=2.5**) وصلت الطاقة المبددة للقيمة (**E=22 KN.m**) في الإطار البيتوني المسلح وللقيمة (**E=98 KN.m**) في الصفائح المعدنية.



الشكل (23) : مقارنة الطاقة المبددة بين الإطار البيتوني المسلح والصفائح المعدنية في النموذج **(SPSW)** **(t_p= 2 mm)** **(مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية)(S–5)** .

4–3 مقارنة بين نموذج (SPSW) بدون مدعمات (S–0) و مع مدعمات (S–5).

يبين الشكل (24) مخطط القوة–الانتقال، فيه المحور الشاقولي يمثل قوة القص المطبقة **(Load–kN)** والمحور الأفقي يمثل الانتقال في أعلى الإطار **(Δ–mm)**، تمت فيه المقارنة بين حالتين للنموذج **(SPSW) كما يلي:**

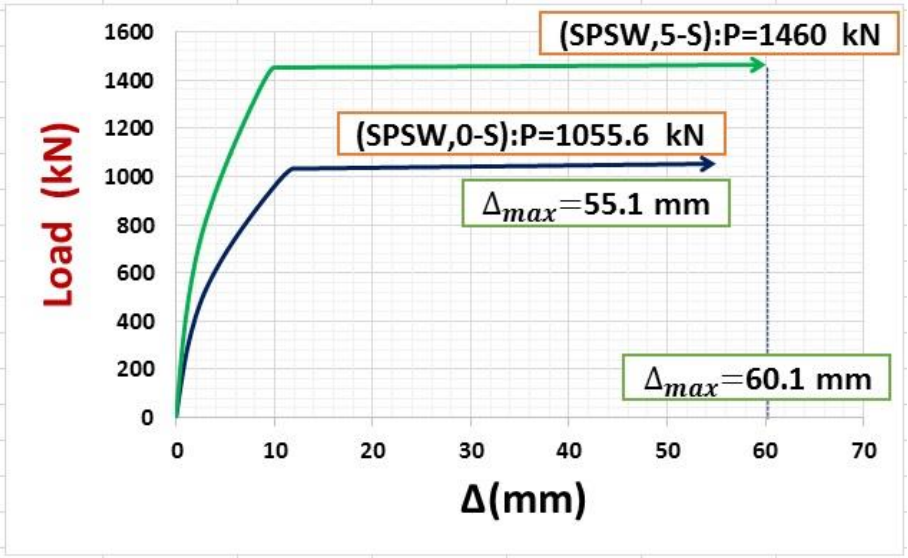
a) بدون مدعمات أفقية أو شاقولية **(SPSW,0–S)**.

b) مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية لكل صفيحة معدنية **(SPSW,5–S)**.

يبين الشكل أن الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية بدون إضافة مدعمات أفقية أو شاقولية أبدى قدرة تحمل وصلت للقيمة **(P=1055.6 kN)** مع **صلابة متوسطة نسبياً**، ومطاوعة انتقال وصلت للقيمة $(\mu = \frac{\Delta_{Max}}{\Delta_y} = \frac{55.1}{12.1} = 4.55)$.

كما ويبين أن الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية المدعمة بالمدعمات المعدنية **(مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية لكل صفيحة معدنية)** أبدى قدرة تحمل ارتفعت بشكل ملحوظ فوصلت

للقيمة (**P=1460 kN**) مع **صلابة أكبر**، ومطاوعة انتقال أفضل ارتفعت للقيمة ($\mu = \frac{\Delta_{Max}}{\Delta_y} = \frac{60.1}{8.1} = 7.42$). كما أن الطاقة المبددة ذكر سابقاً للنموذج (**SPSW,5-S**) **وصلت للقيمة التالية** (**E=120 KN.m**)، وهي أعلى من الطاقة المبددة للنموذج بدون مدعمات (**SPSW,0-S**) والذي وصلت فيه الطاقة المبددة للقيمة (**E=68.2 KN.m**)، وبالتالي زيادة في الطاقة المبددة بين النموذجين بنسبة (**76%**).



الشكل (24): مخطط قوة القص الجانبية–الانتقال للنموذج (**SPSW**) بدون مدعمات (**S–0**) ومع المدعمات (**S–5**).

ويبين الجدول (1) ملخص لجميع النتائج السابقة:

الجدول (1)

النموذج	المقاومة Kn	المطاوعة	تبديد الطاقة Kn m
(SPSW, t_p= 2 mm)	P=1055.6	μ == 5.45	E=68.2
(SPSW, t_p= 4 mm)	P=1524.6	μ == 4.93	E=123

E=72.6	μ == 5.62	P=1150	(SPSW, 2-S, t_p= 2 mm)
E=120	μ == 7.42	P=1460	(SPSW, 5-S, t_p= 2 mm)

5-النتائج النهائية:

1. أكدت نتائج النمذجة العددية الدور الإيجابي لصفائح التقوية الإضافية الفولاذية الرقيقة بكافة حالاتها المدروسة في تحسين أداء الجملة الإنشائية المدروسة من خلال:
   - زيادة المقاومة والمطاوعة والقدرة على تبديد الطاقة عبر التشوهات اللدنة لصفائح التقوية الإضافية الرقيقة وفق حقول الشد المتشكلة في الصفيحة بعد تحنيبها بالقص.
   - تركز الضرر في الصفائح الفولاذية وانخفاضه بنسبة كبيرة في الإطار البيتوني المسلح.
2. أكدت النمذجة العددية مرة أخرى على السلوك المتعارف عليه لصفائح التقوية الإضافية الرقيقة نتيجة تأثير القوة الجانبية حيث أظهرت النتائج أن هذا السلوك يمر بثلاث مراحل أساسية:
   - **المرحلة الأولى:** وهي مرحلة ما قبل التحنيب حيث تكون الصفيحة بحالتها المرنة.
   - **المرحلة الثانية:** تحنيب الصفيحة بالقص وتشكل حقول الشد فيها.
   - **المرحلة الثالثة:** فتنتشر التشوهات اللدنة في صفيحة التقوية الإضافية وفق حقول الشد المتشكلة بعد تحنيب الصفيحة.
3. تظهر النتائج انخفاضاً كبيراً في صلابة **(SPSW)** يزيد عن **50%** بعد تحنيب كل صفائح التقوية الإضافية الفولاذية، ورغم ذلك يبقى النموذج **(SPSW)** قادراً على مقاومة المزيد من الحمولات وهذا يعود للسلوك الغشائي لصفائح الملء الذي يؤدي لتشكل حقل إجهادات شد قطرية بعد التحنيب بما يمنح الصفيحة مقاومة إضافية قبل خضوعها.
4. أظهرت نتائج التحليل العددي قدرة عناصر الإطار البيتوني المسلح (الجوائز والأعمدة) المحيطية بصفائح الملء على تأمين شروط الإرساء اللازمة لتشكل حقول الشد في صفيحة الملء بعد تحنيبها بالقص، إضافة لمساهمة الإطار البيتوني في تبديد الطاقة عبر المفاصل اللدنة المتشكلة في الجوائز والأعمدة عند اتصالها مع القاعدة.
5. تبين النتائج أن زيادة صلابة صفيحة التقوية الإضافية من خلال زيادة سماكتها أدى لزيادة الطلب على الإطار البيتوني المسلح.
6. **تأثير تقوية صفيحة الملء بمدعمات فولاذية على سلوك (SPSW).**

أظهرت النتائج أن تقوية صفائح الملء في **(SPSW)** بعناصر تدعيم أفقية وشاقولية قد حسن كثيراً من أداء **(SPSW)** حيث ازدادت المقاومة والمطاوعة و القدرة على تبديد الطاقة و يمكن تفسير ذلك بأن وجود عناصر التدعيم قد أدى لزيادة مقاومة صفائح التقوية و التدعيم على التحنيب بالقص من خلال تخفيض نحافة صفيحة الملء النسبة $\left(\frac{b}{t}\right)$.

7. بينت النتائج أيضاً أن زيادة مقاومة **(SPSW)** بتقوية صفائح التقوية الإضافية بواسطة عناصر تدعيم معدنية أفقية وشاقولية يمثل حلاً أفضل من زيادة سماكة صفيحة التقوية الإضافية **من وجهة نظر إنشائية**، حيث أن زيادة سماكة الصفيحة يزيد من صلابتها وهذا يزيد الطلب على عناصر الإطار البيتوني، ومن جانب أخر فإن زيادة سماكة الصفائح يؤدي لزيادة وزن المنشأ والقوة الزلزالية التي سيتعرض لها.
8. بينت النتائج أيضاً أن تقوية صفائح التقوية الإضافية بواسطة عناصر تدعيم معدنية أفقية وشاقولية**(SPSW,5-S)** يمثل حلاً أفضل من زيادة سماكة صفيحة التقوية الإضافية **من وجهة نظر زيادة مطاوعة المنشأ والقدرة على تبديد الطاقة**، ولكن من **وجهة نظر اقتصادية** قد تكون تكلفة لحام المدعمات مساوية لتكلفة زيادة سماكة الصفائح المعدنية.

6-المراجع (References)

[1] -الكود العربي السوري **وملحقاته** لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة 2020-منشورات نقابة المهندسين، سوريا.

[1] نقابة المهندسين السورية.

Syrian Engineers Syndicate. (2020). ***Syrian Arab code for the design and implementation of reinforced concrete structures and its supplements*****. Publications of Engineers Syndicate.**

[2] معهد الإنشاءات الفولاذية الأمريكي (AISC).

American Institute of Steel Construction (AISC). (2010). ***Seismic provisions for structural steel buildings*** **(ANSI/AISC 341-10). AISC.**

[3] مجلس التكنولوجيا التطبيقية (ATC).

Applied Technology Council (ATC). (1996). ***Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*** **(Vol. 1, ATC-40). Seismic Safety Commission.**

[4] الجمعية الكندية للمعايير (CSA).

Canadian Standards Association (CSA). (2001). ***Limit states design of steel structures*** **(CAN/CSA S16-01). CSA.**

[5] (بحث تشوي وبارك مجلة هندسة المنشآت).

Choi, R., & Park, G. (2011). Cyclic loading test for reinforced concrete frame with thin steel infill plate. ***Engineering Structures, 137,*** **654–664.**

[6] برنامج أباكوس إصدار (2026).

Dassault Systèmes. (2026). ***Abaqus standard user's manual*** **(Version 2026 FD01) [Computer software]. Dassault Systèmes Simulia Corp.**

دور المرونة في تعزيز استدامة البناء التراثي والتكيُّف مع الاستخدامات الجديدة – نحو اقتصاد دائري مستدام

الدكتورة: علا خيطو *

ملخص البحث

تنبثق الأهمية الحقيقية للمرونة من كونها مبدأً تصميمياً يلبّي متطلَّبات التطوُّر المستمر تكنولوجياً واجتماعياً وفيزيائياً، متوافقةً بذلك مع توصيات التنمية المستدامة التي تدعو لتشييد منشآت عالية الأداء. وتُعد المرونة المتطلب الأساسي لـ **تعزيز استدامة البناء التراثي والتكيف مع الاستخدامات الجديدة** عبر منهجيات واستراتيجيات إعادة الاستخدام التكيفي؛ إذ تُسهم في توجيه مشاريع إعادة التأهيل لإنتاج فراغات معمارية قابلة للتعديل مع مرور الزمن وملاءَمة الاحتياجات المتغيرة، مما يضمن الحفاظ على قيمتها المادية والتاريخية.

يستقصي هذا البحث طبيعة العلاقة المتبادلة بين مبدأ المرونة ومفهوم الاستدامة في حماية وإعادة الاستخدام التكيفي للأبنية التراثية؛ بهدف الوصول إلى صيغة متوازنة تجمع بين الحفاظ على الأصالة والقيمة الثقافية للموقع من جهة، وتلبية المتطلبات البيئية من جهة أخرى. وتتطلع الدراسة إلى تفعيل **دور المرونة في تعزيز استدامة البناء التراثي والتكيف مع الاستخدامات الجديدة** من خلال رصد وتقييم الممارسات التطبيقية لمبانٍ تاريخية خضعت لإعادة التأهيل والتوظيف، وذلك لتحديد الأدوات والمعايير التصميمية والتنظيمية التي تدعم هذه الاستجابة المرنة، دون المساس بالقيمة التاريخية والتراثية للمبنى.

توصل البحث إلى أنَّ **مبدأ الاقتصاد الدائري** يمثل المُرتكز الأهم في هذه المشاريع، بالتكامل مع الحفاظ على الأصالة، واسترداد الطاقة الكامنة في المواد، وتفعيل المشاركة المجتمعية، إلى جانب مرونة الأطر التشريعية والتنظيمية وفقاً لدرجة تصنيف المبنى. وتؤكد النتائج أنَّ هذه الممارسات التطبيقية تجسِّد حلقة الوصل الجوهرية التي تجمع بين مبدأي المرونة والاستدامة في مشاريع إعادة التوظيف للأبنية التراثية، وتزداد أهمية تمتين هذه الحلقة في المنشآت ذات القيمة التاريخية لتمكينها من **التكيُّف الكفؤ مع الاستخدامات الجديدة.** مع إبراز الأهمية الاستراتيجية لتبني **تقنية التوائم الرقمية** (Digital Twins)كأداة تكنولوجية داعمة للاستدامة، تكمن قيمتها الجوهرية في القدرة على نمذجة ومحاكاة الإجراءات المرنة واختبار مدى تحققها الفعلي قبل القيام بأي تدخل مادي ملموس للمبنى التراثي.

الكلمات المفتاحية: إعادة الاستخدام التكيُّفي – المرونة – الأبنية التراثية – الاستدامة – الاقتصادي الدائري – القدرة على التكيُّف– القيمة الثقافية.

* مدرس –كلية الهندسة المعمارية– قسم التصميم المعماري، جامعة دمشق،
ola.khito@damascusuniversity.edu.sy

The role of flexibility in promoting the sustainability of heritage buildings and adapting to new uses- Towards a sustainable circular economy.

Dr. Ola Khito *

Abstract

The true importance of flexibility stems from its role as a design principle that meets the demands of continuous technological, social, and physical development, thus aligning with sustainable development recommendations that call for the construction of durable and high-performance buildings. Flexibility is a fundamental requirement for enhancing the sustainability of heritage buildings and adapting them to new uses through adaptive reuse methodologies and strategies. It contributes to guiding rehabilitation projects to produce architectural spaces that can be modified over time and accommodate changing needs, ensuring the preservation of their material and historical value.

This research explores the nature of the reciprocal relationship between the principle of flexibility and the concept of sustainability in the protection and adaptive reuse of heritage buildings. Its aim is to arrive at a balanced formula that combines preserving the authenticity and cultural value of the site with meeting environmental requirements. The study seeks to activate the role of flexibility in enhancing the sustainability of heritage buildings and adapting them to new uses by monitoring and evaluating the practical applications of historical buildings that have undergone rehabilitation and reuse. This will identify the design and organizational tools and standards that enable this flexible response without compromising the historical and heritage value of the building.

The research concluded that the circular economy principle is the cornerstone of these projects, integrated with preserving authenticity, recovering the energy inherent in materials, and activating community participation, alongside the flexibility of legislative and regulatory frameworks according to the building's classification. The results confirm that these applied practices embody the essential link between the principles of flexibility and sustainability in heritage building repurposing projects. Strengthening this link is particularly important for structures of historical value to enable them to adapt efficiently to new uses. The strategic importance of adopting digital twins technology as a technological tool supporting sustainability is highlighted, as its core value lies in the ability to model and simulate flexible procedures and test their feasibility before any tangible physical intervention for heritage building.

Keywords: Adaptive reuse – Flexibility – Heritage buildings – Sustainability – Circular economy – Adaptability – Cultural value

*Doctor, Faculty of Architecture, Department of Architectural Design, Damascus University, ola.khito@damascusuniversity.edu.sy

- **مقدمة:**

تُعدّ المباني التراثية ذات أهمية جوهرية للمشهد الحضري؛ إذ لا تقتصر قيمتها على كونها معالم بارزة في المدينة، بل تمتد لتشكل فضاءات تعكس خصائص ثقافية وتاريخية تُسهم في تعريف هوية المجتمع المحلي. ويُمثل تجديد هذه المساحات وسيلةً لإعادة إحياء المناطق الحضرية وصون الذاكرة الجمعية، كما يُتيح فرصةً لدمج الفوائد البيئية في محيطها بالكامل عبر تفعيل دور المرونة في تعزيز استدامة البناء التراثي .بناءً على ذلك، تكتسب الأبنية التي تتطور باستمرار أهمية بالغة من خلال إعادة توظيف ماضيها للأجيال القادمة، بما يضمن التكيُّف مع الاستخدامات الجديدة والاحتياجات المتغيرة التي تنشأ زمنياً، والتي تتطلب بدورها دمج مفهوم المرونة في مراحل التصميم، والتقييم، والتأهيل، وإعادة التوظيف. يتجلى هذا التوظيف عبر ممارسات هندسية متعددة، يُعتبر "إعادة الاستخدام التكيفي" من أبرزها، والذي تزداد قيمته الأكاديمية والتطبيقية ارتباطاً بمعايير الاستدامة عند التعامل مع المنشآت التاريخية. ومن هنا تبرز الأهمية الموضوعية للبحث، حيث يعالج التَّحديات الراهنة في ربط مفهوم المرونة بممارسات إعادة التوظيف، وربطها تكاملياً بالاستدامة، لإلقاء الضوء على المرتكزات الأساسية التي تدعم هذين المفهومين، وتضمن قدرة الأبنية التراثية على التكيُّف مع الاستخدامات الجديدة بكفاءَة وديمومة.

- **إشكالية البحث:** تكمن مشكلة الدراسة في غياب آليات توظيف مفهوم المرونة في مشاريع إعادة تأهيل وتوظيف الأبنية التراثية؛ الأمر الذي يحد من قدرتها على التكيُّف مع الاستخدامات الجديدة .ويحدث هذا القصور بالرغم من القيمة الحضارية والمادية الفريدة لعناصر تلك المنشآت بوصفها موارد نادرة ومستدامة، وفي ظل تنامي التوجهات العالمية الرامية إلى تفعيل محددات الحفاظ المستدام في قطاع البناء والتشييد.
- تنبع **أهمية البحث** من دوره في صياغة محددات ومسارات إجرائية واضحة تضمن دمج مبدأ المرونة بممارسات إعادة الاستخدام التكيفي، وبيان طبيعة الارتباط التكاملي بين هذه الممارسات ومعايير الاستدامة البيئية، فضلاً عن تحديد وتأصيل أهم التطبيقات الهندسية التي تدعم استمرارية المنشأة وتطورها الوظيفي.
- **هدف البحث:** يهدف البحث إلى تقييم دور المرونة في تعزيز استدامة البناء التراثي والتكيُّف مع الاستخدامات الجديدة عبر رصد ممارسات إعادة التوظيف التكيفي، وقياس مدى إسهامها في ترسيخ الأداء البيئي للمبنى التاريخي.

- **منهجية البحث**، أتت المنهجية على الشكل التالي:

المنهج النظري :ويستهدف تأصيل مفهوم المرونة التصميمية في أطر إعادة الاستخدام التكيفي، واستخلاص المعايير المنهجية الكفيلة بتعزيز الاستدامة ضمن هذه الممارسات.

المنهج التحليلي المقارن :ويقوم على اختبار المبادئ المستنبطة ومعايرتها عبر إسقاطها على حالات دراسية عالمية مرجعية لتحديد كفاءتها. ورصد الفجوات المشتركة في كل منها.

1- الاستخدام التكيُّفي (Adaptive Reuse):

1-1- إعادة الاستخدام التكيُّفي للأبنية بشكل عام:

تُشكّل مرونة المباني القائمة الركيزة الأساسية في عملية "إعادة الاستخدام التكيُّفي"، والتي تُعرَّف إجرائياً بأنها هندسة تعديل الهيكل الإنشائي الأصلي للمبنى وصونه، ليتلاءم مع متطلبات وظيفية مستحدثة تختلف عن غرضه التصميمي الأول. وتبرز أهمية هذه المقاربة المرنة في قدرتها على تمديد الدورة الحياتية للمنشأ، وتعزيز أبعاد الاستدامة الثلاثة (البيئية، والاقتصادية، والاجتماعية). وتؤكد الدراسات المرجعية كفاءة هذا التوجه اقتصادياً؛ حيث تساهم الاستجابة المرنة للهيكل الأصلي في خفض تكاليف الاستثمار بنسبة تتراوح بين 10-12% في المتوسط مقارنة ببديل الهدم وبناء منشآت جديدة، وذلك عبر استثمار الحد الأقصى من الكتلة الإنشائية القائمة والحفاظ على أصالتها المادية[10]. ويعرف بإعادة تصميم المبنى وتعديله لدعم وظيفة جديدة لم يكن مُصمماً لخدمتها في الأصل.[8] AIA [1]

1-2- إعادة الاستخدام التكيُّفي في السياق التراثي: الصون والاستدامة الوظيفية:

يتجاوز مفهوم إعادة الاستخدام التكيُّفي في البيئة التراثية مجرد كونه خياراً وظيفياً، ليصبح استراتيجية مرنة ومحورية لصون الإرث المعماري وحمايته من التدهور والاندثار. تتجلَّى مرونة البناء التراثي في قدرته على استيعاب توظيف مستدام، يُشكل ركيزة لتمويل أعمال الصيانة الذاتية وضمان الإبقاء على حيوية المنشأ. وتُعد هذه المقاربة التكيُّفية من أكثر المنهجيات كفاءَة من الناحية الاقتصادية مقارنة ببدائل الترميم؛ نظراً للعوائد الاستثمارية التي تحققها، شريطة أن تلتزم التعديلات بحدود "المرونة المُتاحة" التي تضمن عدم تعارض الوظيفة المستحدثة مع القيم التاريخية للأثر. [2]

وفي هذا السياق، يُشكل قطاع صون التراث رافداً اقتصادياً حيوياً، ومورداً تنموياً متعدَّد العوائد؛ إذ تساهم استراتيجيات التَّطوير المرن وإعادة الاستخدام في رفع القيمة الاستثمارية للأصول التراثية، وتحويلها إلى أقطاب جذب سياحي تدعم التنمية الحضرية المستدامة بمحاورها الاقتصادية والاجتماعية والثقافية. ولا تقتصر هذه المرونة على الأبعاد الوظيفية فحسب، بل تمتد لتشمل الاستدامة البيئية من خلال إطالة الدورة الحياتية للمواد والموارد المبنية؛ حيث يساهم استثمار العناصر الهيكلية القائمة في خفض معدلات

[1] The American Institute of Architects

الهدر، وتقليل النفايات الكربونية الناتجة عن البناء الجديد، وتسهيل عمليات إعادة التدوير، مما يحقق معادلة التوازن بين متطلبات التطوير المعاصر والحفاظ على الهوية الثقافية العالمية [10].

1-3- محاور الاستدامة في مشاريع إعادة الاستخدام التكيُّفي:

يُشكل التوظيف التكيفي المستدام نهجاً تصميمياً مبتكراً يرتكز بالدرجة الأولى على **مرونة المنشأ** وقابليته للتحوُّل الفراغي، بهدف صياغة بيئات وظيفية معاصرة تلبي المتطلبات المستحدثة. وتُصنف هذه المنهجية ضمن ممارسات التنمية المستدامة الرائدة؛ كونها تتيح استثمار "الطاقة الكامنة (Embodied Energy)" الكثيفة في الهياكل القائمة وتمديد عمرها الافتراضي. وتنعكس هذه المرونة التطبيقية إيجابياً على البيئة عبر الحد من استنزاف المواد الخام، وخفض الانبعاثات الكربونية المرتبطة بالتصنيع، وتقليص نفايات الهدم والبناء. فضلاً عن ذلك، يمثل هذا التحول المرن أداة استراتيجية لرفع الكفاءة التشغيلية للمبنى وتعزيز جدواه الاقتصادية، مما يضمن تحقيق توازن متكامل بين الأبعاد البيئية، والاجتماعية، والاستثمارية للمحيط المبني.[10] **تتمثل نقاط القوة فيه بمايلي:** الاستجابة للمتطلبات الحالية –القدرة على التكيف –الاستفادة من المساحة –قابلية التوسع/الابتكار –الأصالة –التوافق –حدود وأساليب الإدارة –تكامل المشاريع –الإدارة البيئية –الأثر المالي –الديناميكيات الاقتصادية. [12]

2- التراث والأبنية التراثية: المحددات المفاهيمية والقيمية:

يُمثل التراث الوعاء المادي لذاكرة الأمة الحيَّة، والشاهد التاريخي المُتأثر بالتحولُات الاقتصادية، والاجتماعية، والعمرانية عبر العصور. وتُعد الأبنية التراثية الحصاد المعماري والترجمة الفراغية الملموسة لهذه التحولات الحضارية؛ حيث تحتل المرتبة الأولى بين مصادر التوثيق التاريخي باعتبارها الشاهد المادي الأبرز على عبقرية المكان، مما يجعل من حتمية الحفاظ عليها وصون نسيجها الأصلي ضرورةً أساسية لضمان ديمومتها واستدامتها الحضرية.[3] أمَّا الأبنية التراثية فتتميز بتعدُّدية قيمها معمارية، وجمالية، وتاريخية، واجتماعية، واقتصادية، فضلاً عن دلالاتها الرمزية والروحية التي تجعل منها رمزاً مُلهماً للهوية الثقافية ورابطاً حيَّاً بالماضي. ويُعد صمود هذه المباني عبر الزمن برهاناً على مرونتها الإنشائية والثقافية؛ وهي ميزة ديمومة تمنحها استحقاقاً عالياً للاعتراف بقيمتها الاستثنائية، ليتحوَّل كل منشأ تراثي إلى وثيقة تاريخية حية تساهم في إثراء الفهم الإنساني العام للتراث الثقافي واستدامته. [17]

3- مفهوم المرونة:

تُعرَّف المرونة لغوياً بأنها القدرة على التغير بما يتوافق مع الظروف الطارئة؛ أما في الفكر المعماري، فتتجلى كمفهوم استراتيجي يُعنى بضمان ديمومة تشغيل المنشأ واستمرارية كفاءته الوظيفية رغم تغير المتطلبات والاشتراطات المعاصرة. وتتحقق هذه المرونة من خلال قابلية الفراغ المعماري لإعادة التشكيل والتطويع، مما يمكّن البناء من استيعاب الاستخدامات الجديدة والاندماج معها بفعالية دون المساس بجوهره الإنشائي. [4]،[13] وبناءً على ذلك، يمكن التعبير عن المرونة كمنهجية تصميمية تستجيب بفاعلية للمؤثرات الخارجية والداخلية الدافعة للتطور الوظيفي. وتُستخدم هذه المقاربة لوصف كفاءة الفراغات المعمارية وقدرتها على استيعاب استخدامات متعددة، مما يتيح للمستفيدين خيارات تشغيلية وتطويرية أوسع تضمن حيوية المبنى واستدامته عبر الزمن. [7]

وتتأصل المرونة في الهندسة المعمارية والتصميم البيئي باعتبارها القدرة الديناميكية على تطويع وإعادة تنظيم البيئة المبنية استجابةً للمتطلبات الوظيفية المستجدة. وفي هذا السياق، يذهب المنظّر المعماري "فريدمان (Friedman)[2] "إلى تعريف المرونة من منظور تشاركي؛ إذ يرى أنها تكمن في تمكين المستخدم من المساهمة الفاعلة في اتخاذ القرارات التصميمية، وتزويده بالأدوات الهندسية والإدارية اللازمة لخلق توازن وتوافق مستمر بين احتياجاته المتغيرة والمتطورة من جهة، والفضاء المعماري والسكني الذي يشغله من جهة أخرى.[4] [13] في عصر ما بعد الحداثة، أُدينت النزعة الوظيفية الصارمة الحديثة، وتمَّ التركيز على تنوع الوظائف وتعدُّدها .وقد أكد روبرت فنتوري[3] على المساحات المعمارية متعددة الوظائف في كتابه "التعقيد والتناقض في العمارة .(1966) "كما اهتمت حركة "أرشغرام" وحركة "الميتابوليزم" بأفكار جديدة حول الهياكل المرنة المستقبلية[7]

3-1- أنواع المرونة:

تنقسم المرونة المعمارية إلى مستويين رئيسيين؛ أولهما **المرونة الداخلية**، وتتمحور حول إعادة تنظيم الوظائف الفراغية أو تعديل تكوينها الهندسي، سواء من خلال تدخلات فيزيائية ملموسة أو عبر إعادة التوظيف الديناميكي للفراغ دون الحاجة لتعديل إنشائي. وثانيهما **المرونة الخارجية**، وترتبط بقدرة المنشأ على استيعاب التوسعات الإنشائية وإضافة كتل جديدة لتلبية متطلبات وظيفية مستحدثة يتعذر استيعابها داخلياً، أو إجراء تدخلات تطويرية على الغلاف الخارجي للمبنى؛ بهدف الارتقاء بكفاءته البصرية

[2] Yona Friedman يونا فريدمان، مهندس معماري ومخطط مدن فرنسي، كان له تأثير كبير في أواخر الخمسينيات وأوائل الستينيات، واشتهر بنظريته عن "العمارة المتحركة ."في عام 2018، مُنح جائزة فريدريك كيسلر النمساوية للعمارة والفنون.

[3] Robert Venturi مهندسًا معماريًا أمريكيًا، والمؤسس والرئيس لشركة فينتوري .ساهم في تشكيل الطريقة التي يختبر بها المهندسون المعماريون والمخططون والطلاب الهندسة المعمارية والبيئة المبنية ويفكرون فيها.

وتحقيق التوافق مع المتطلبات الجمالية والاجتماعية المعاصرة، دون المساس بالفضاءات الداخلية [4]،[13]

3-2- محددات التمايز والتكامل بين المرونة والقدرة على التكيُّف:

منذ أن أكدَّ المعماري "والتر غروبيوس (Walter Gropius)[4] "على محورية "المرونة" ودورها في صياغة "نمط الحياة الحديث" عام 1954، تحوَّل هذا المفهوم إلى أحد أكثر المصطلحات جاذبية وتداولاً في الفكر الهيكلي والمعماري. وعلى الرغم من استخدام مصطلحي "المرونة" و"القدرة على التكيف" بشكل تبادلي ومتداخل لدى العديد من الأدبيات، إلا أن هناك اتجاهاً بحثياً يسعى للفصل المعرفي بينهما؛ حيث يُنتقد أحياناً التوظيف العشوائي لمصطلح المرونة وخلطه بمفاهيم مثل "الرشاقة" و"الاستجابة". وفي سياق هذا التمايز، يرى باحثون أن **المرونة** ترتبط بالقدرة على إيجاد حلول مادية وإنشائية ملموسة لمواجهة التوسعات والتغيرات الفيزيائية للمبنى، في حين تُعنى **القدرة على التكيف** بالاستجابة للأبعاد الاجتماعية والمجتمعية، مما يتيح إمكانية تشغيل الفراغ المعماري ذاته لاستيعاب وظائف وأنشطة متعددة ومتغيرة عبر الزمن. [19] وقدرة المساحة على التعديل لاستخدامات تتجاوز الغرض الذي صُممت من أجله في الأصل. [8]

يعرف البحث المرونة بأنَّها: قُدرة المنشأ التراثي على الاستجابة للوظائف المستحدثة عبر تدخلات مدروسة؛ كالحلول التكيُّفية للأنظمة الداخلية (الكهرباء والصرف)، والتَّعديلات الفراغية المتوافقة مع القيمة التصنيفية للمبنى. يهدف ذلك إلى تعزيز استدامة الأثر، وإطالة عمره الافتراضي، وإحياء قيمته التاريخية مع صون واجهاته الخارجية.

3-3- نماذج إعادة الاستخدام التكيُّفي ومحددات ارتباطها بمفهوم المرونة:

يكشف التحليل المقارِن لمشاريع إعادة الاستخدام التكيُّفي عن ثلاثة مستويات رئيسية للتدخل المعماري تشمل: تعديل الشكل الحضري، وتطوير الواجهات، وإعادة التشكيل الفراغي، وذلك لاستيعاب استخدامات معاصرة تدعم التشغيل المرن للمبنى وتتأثر بسياقه التراثي ووظيفته الأصلية. ورغم التحديات المرتبطة بصرامة قوانين الحفاظ، والتمويل، ومعادلة التوازن بين المتطلبات الحديثة والقيمة الأثرية، يتبنى البحث ثلاثة نماذج مرنة ومبتكرة :**النموذج الهجين** الذي يدمج عدة وظائف معاً، و**النموذج الموسمي** الذي

[4] والتر أدولف جورج غروبيوس)معماري ألماني أمريكيا ومؤسس مدرسة" باوهاوس"، رائد في العمارة الحديثة. أسس مدرسة باوهاوس في فاييمار ودرّس فيها لعدة سنوات.

تتغير أنشطته دورياً حسب الفعاليات، و**النموذج التراكمي** الذي يعكس تعاقب عمليات إعادة الاستخدام عبر الزمن ليسرد قصة التطور التاريخي للمبنى ويضمن استدامته[16] .

4- التراث المعماري ومقاربات الاستدامة الشاملة:

4-1- الحفاظ المستدام كمدخل لديمومة المنشآت التراثية:

يُعرَّف الحفاظ على المباني التراثية بأنه منظومة الإجراءات والتدخلات الممنهجة الرامية إلى صيانة وحماية نسيجها المادي من التلف والاندثار، صوناً لقيمها التاريخية، والفنية، والأثرية من أي مؤثرات سلبية قد تخل بأصالتها. يتسع هذا المفهوم ليشمل كافة المقاربات والأساليب الهندسية والتنظيمية التي تتيح استدامة المنشأ، وإطالة عمره الافتراضي، وضمان استمرارية أدائه عبر الزمن كوثيقة حضارية حية.[3] وفي المقابل، يُعبّر الحفظ المستدام عن منهجية تطبيقية لصون التراث المعماري عبر مشاريع ذات جدوى اقتصادية، تهدف إلى استثمار الموروث وتوظيفه بكفاءة لتلبية متطلبات الحاضر مع تأمين حمايته القصوى لضمان انتقاله للأجيال القادمة. تتجسد الاستدامة في أطر الحفاظ كركيزة للتنمية الشاملة التي توازن بين سد الاحتياجات المجتمعية الراهنة، والحفاظ على الحقوق التراثية للأجيال المستقبلية دون إضعاف قدرتها على الوفاء بمتطلباتها.[1]

4-2- السمات المشتركة بين مقاربات الحفاظ والاستدامة:

- **ترابط الأهداف** :الإدارة المسؤولة للموارد وصون المكنونات الثقافية والطبيعية.
- **المناهج التكاملية** :تبني استراتيجيات الحفاظ الواعي القائم على الاستخدام المستدام.
- **الاعتبارات البيئية** :توظيف مواد صديقة للمحيط والتخفيف من التغيُّر المناخي.
- **المشاركة المجتمعية** :دمج المجتمع المحلي لحماية الهوية
- **الحفاظ على التراث الثقافي**: التركيز على الأصالة لضمان مرونة المجتمعات واستدامتها.
- **دمج الطاقة المتجددة** :إدخال تقنيات الطاقة المتجددة لترشيد الاستهلاك داخل الأثر.
- **شمولية القرار** اتخاذ قرارات متكاملة تتسق مع أبعاد التنمية الخضراء.
- **التثقيف والتوعية** :رفع الحس العام لتقدير التراث وإبراز أهمية صون أصالته[17] .

5- استراتيجيات الاقتصاد الدائري وتأثيرها في ديمومة البيئة التراثية المبنية:

يُعرَّف الاقتصاد الدائري بأنه نموذج تنموي يرتكز على إعادة استثمار المواد وضمان دورانها في حلقة مغلقة عبر آليات السوق. ونظراً لأنَّ قطاعي البناء والتشييد يمثلان المستهلك الأكبر للطاقة والموارد الطبيعية، تبرز مشاريع صون التراث المعماري وإعادة استخدامه كاستراتيجية دائرية مثالية للحد من هذا الاستنزاف، عبر إحلال بدائل الترميم والتأهيل والتجديد محل خيارات الهدم والبناء الجديد الهادرة للطاقة. ويُعد الاستخدام المستمر للمبنى وقابليته

للتكيف بمرور الوقت المحدد الأساسي لمدى توافقه مع معايير الاقتصاد الدائري؛ حيث يسهم تشغيل الأنظمة التقليدية القديمة بمرونة، واستيعاب الفراغات لوظائف متعددة ومستخدمين متنوعين، في تعظيم الكفاءة التشغيلية للمنشأ، وترشيد استهلاك المواد، وتحقيق الاستدامة الاقتصادية والبيئية المثلى للأثر .[11]

ويرتبط الاقتصاد الدائري في البيئة التراثية ارتباطاً وثيقاً بمفهوم "الطاقة الكامنة (Embodied Energy) " المحتواة في الهيكل الإنشائي الأصلي؛ حيث يمثل الحفاظ على المبنى وتأهيله تدويراً غير مباشر للطاقة الكثيفة التي استُهلكت في تصنيع ونقل مواده التقليدية (كالمرمر، والحجر، والأخشاب) منذ عقود. وبناءً على ذلك، فإن تطبيق الحلول المرنة لإعادة الاستخدام التكيُّفي لا يضمن الجدوى الاستثمارية للأثر فحسب، بل يمنع تدفق أطنان من نفايات الهدم إلى المحيط البيئي، ويقلل من الحاجة لاستنزاف موارد بكر جديدة، مما يرفع من تصنيف المبنى التراثي كأصل مستدام يساهم بفعالية في خفض البصمة الكربونية للقطاع المعماري المعاصر .[14]

يرتكز الاقتصاد الدائري في العمارة التراثية على مفهوم "التفكيك المرن والتدخلات العكوسة Reversible) " (Interventions؛ حيث يُشترط في الأنظمة الوظيفية والهياكل المستحدثة داخل الأثر أن تُصمم بطريقة قابلة للتفكيك وإعادة التدوير مستقبلاً دون إلحاق أي ضرر بالنسيج المادي الأصلي للمبنى. إنَّ هذا النهج يضمن استمرارية الدورة الدائرية للمنشأة، بحيث لو تغيرت الوظيفة المعاصرة بعد عقود، يُمكن إزالة التعديلات الحديثة بسهولة واستبدالها بوظائف أخرى، مما يحمي القيمة التراثية للأثر ويُتيح له "**مرونة مستقبلية مستدامة**" دون هدر للموارد[9]

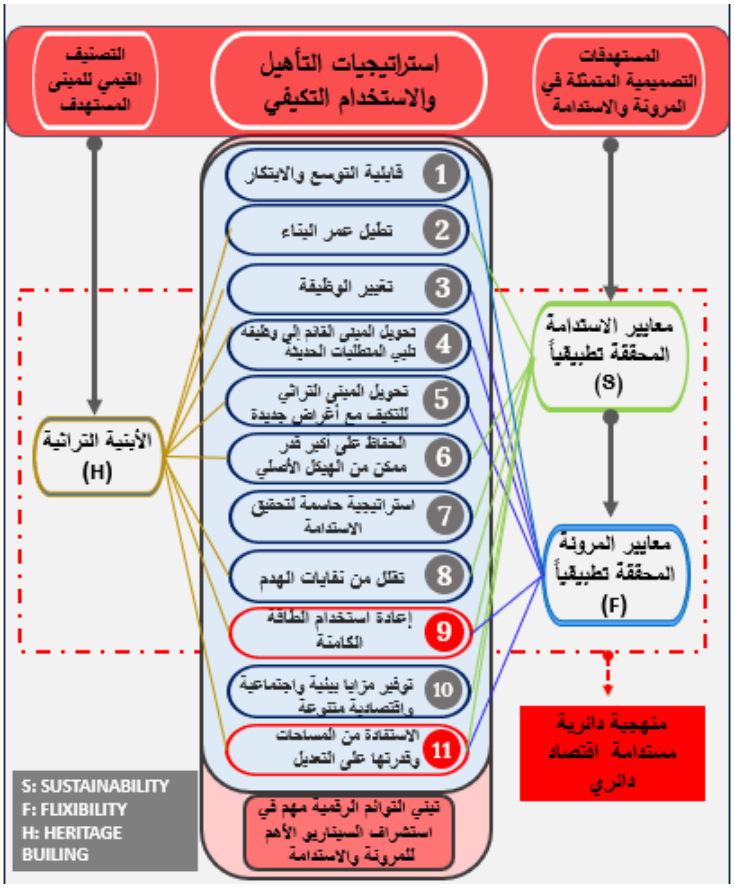
6- نمذجة معلومات المباني التراثية (HBIM) كأداة لتعزيز المرونة والاستدامة:

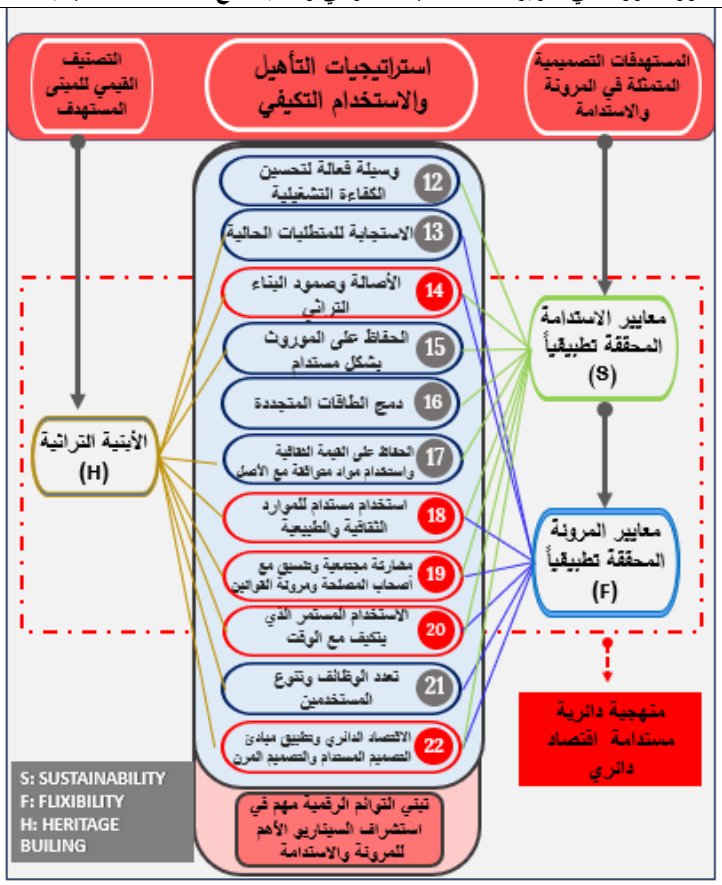
يخدم محور "التوأمة الرقمية ونمذجة معلومات المباني التراثية ."(HBIM) مباشرة "المرونة والاستدامة"؛ لأنه يوضح كيف نستخدم التكنولوجيا الحديثة للتنبؤ بمرونة المبنى قبل التدخل فيه فيزيائياً، مما يضمن صونه واستدامته. حيث يُمثل دمج التكنولوجيا الرقمية عبر "نمذجة معلومات المباني التراثية " (Heritage Building Information Modeling – HBIM)مدخلاً استراتيجياً حديثاً لضمان استدامة الأصول التاريخية وتفعيل مرونتها الوظيفية. تتيح هذه المنظومة الرقمية إنشاء "توأم رقمي " (Digital Twin)فائق الدقة يحاكي الخصائص الإنشائية، والمادية، والحرارية للمبنى التراثي. وتبرز أهمية هذه الأداة في قدرتها على اختبار "سيناريوهات المرونة والتكيف" افتراضياً قبل البدء بالتدخل المادي؛ حيث يمكن للمصممين تقييم مدى استجابة الهيكل الإنشائي القديم للوظائف المعاصرة المستحدثة، وتحديد كفاءة أنظمة الطاقة والصرف الجديدة ومواقعها المثلى دون الإضرار بالنسيج الأثري الأصلي. وبناءً على ذلك، تساهم هذه التقنية في ترشيد نفقات الصيانة طويلة الأمد، والحد من الأخطاء

التنفيذية المسببة للهدر البيئي والمادي، مما يضمن اتخاذ قرارات ترميمية مستدامة تحافظ على أصالة الأثر وتطيل عمره الافتراضي [18]

7- استراتيجيات التأهيل والاستخدام التكيفي للأبنية التراثية وارتباطها بمعايير المرونة والاستدامة:

من الدراسة النظرية تم استخلاص العلاقة البنيوية لمفهومي المرونة التصميمية والاستدامة المعمارية في إطار مخططات توضيحية متكاملة، تبيّن تداخل محددات الحفاظ مع متطلبات التكيُّف الوظيفي المُعاصر، كما هو موضح تفصيلاً في المخطط (1) والمخطط (2) الواردين في (الصفحة 10) .


التصنيف القيمي للمبنى المستهدف
استراتيجيات التأهيل والاستخدام التكيفي
المستهدفات التصميمية المتمثلة في المرونة والاستدامة
1 قابلية التوسع والابتكار
2 تطيل عمر البناء
3 تغيير الوظيفة
4 تحويل المبنى القائم إلى وظيفة تلبي المتطلبات الحديثة
5 تحويل المبنى التراثي للتكيف مع أغراض جديدة
6 الحفاظ على اكبر قدر ممكن من الهيكل الأصلي
7 استراتيجية حاسمة لتحقيق الاستدامة
8 تقلل من نفايات الهدم
9 إعادة استخدام الطاقة الكامنة
10 توفير مزايا بيئية واجتماعية واقتصادية متنوعة
11 الاستفادة من المساحات وقدرتها على التعديل
الأبنية التراثية (H)
معايير الاستدامة المحققة تطبيقياً (S)
معايير المرونة المحققة تطبيقياً (F)
منهجية دائرية مستدامة اقتصاد دائري
تبني التوائم الرقمية مهم في استشراف السيناريو الأهم للمرونة والاستدامة
S: SUSTAINABILITY
F: FLIXIBILITY
H: HERITAGE BUILING



المخطط (1)، (2). بنود استراتيجيات التأهيل والاستخدام التكيفي للأبنية التراثية وارتباطها بمعايير المرونة والاستدامة المحققة تطبيقياً. إعداد الباحثةيستعرض الجدول التالي استراتيجيات التأهيل والتوظيف التكيفي التي تمحورت حول تبني "المرونة" و"الاستدامة" كأهداف تصميمية وتشغيلية حاسمة. وقد خلص التحليل إلى تحديد سبع ممارسات استراتيجية جوهرية تضمن تحقيق هذا التكامل التطبيقي؛ جرى تمييزها باللون البنفسجي ضمن الجدول التحليلي أدناه لتوضيح آليات تفعيلها ومعايير قياسها في الأبنية التراثية.

الجدول (1): استراتيجيات التأهيل والاستخدام التكيفي للبناء التراثية وارتباطها بمعايير المرونة والاستدامة

استراتيجيات التأهيل والتوظيف التكيفي	مرتبط / غير مرتبط بالبناء التراثي	هدف تصميمي محقق
قابلية التوسع والابتكار	-	مرونة – إضافة
تطيل عمر البناء	√	استدامة
تغيير الوظيفة	√	مرونة

تحويل المبنى القائم إلى وظيفة تلبي المتطلبات الحديثة	√	مرونة
تحويل المبنى التراثي للتكيف مع أغراض جديدة	√	مرونة
الحفاظ على أكبر قدر ممكن من الهيكل الأصلي	√	استدامة
استراتيجية حاسمة لتحقيق الاستدامة	-	استدامة
تقلل من نفايات الهدم	√	استدامة
إعادة استخدام الطاقة الكامنة	√	**مرونة واستدامة**
توفير مزايا بيئية واجتماعية واقتصادية متنوعة	-	استدامة
الاستفادة من المساحات وقدرتها على التعديل	√	**مرونة واستدامة**
وسيلة فعالة لتحسين الكفاءة التشغيلية	-	استدامة
الاستجابة للمتطلبات الحالية	√	مرونة
الأصالة وصمود البناء التراثي	√	**مرونة واستدامة**
الحفاظ على الموروث بشكل مستدام	√	استدامة
دمج الطاقات المتجددة	-	استدامة
الحفاظ على القيمة الثقافية	√	استدامة
استخدام مستدام للموارد الثقافية واستخدام مواد متوافقة مع الأصل	√	**مرونة واستدامة**
مشاركة مجتمعية وتنسيق مع أصحاب المصلحة	√	**مرونة واستدامة**
الاستخدام المستمر الذي يتكيف مع الوقت	√	**مرونة واستدامة**
تعدد الوظائف وتنوع المستخدمين	√	مرونة
الاقتصاد الدائري وتطبيق مبادئ التصميم المستدام والتصميم المرن	√	**مرونة واستدامة**

المصدر: إعداد الباحثة بالاستناد إلى المراجع [2] [10] [12] [17]

8- الحالات الدراسية ومحدِّدات اختيارها:

يستعرض هذا المحور دراسة تحليلية مقارنة لأربعة نماذج تطبيقية لمبانٍ تراثية؛ تشمل حالتين عالميتين، وحالة إقليمية (عربية)، بالإضافة إلى حالة دراسية محلية في مدينة دمشق القديمة، وذلك بهدف اختبار منهجيات التوظيف التكيُّفي ورصد كفاءة معايير المرونة والاستدامة المحققة تطبيقياً في هذه النماذج. وقد استندت معايير اختيار هذه الحالات إلى محددات علمية دقيقة، تمثلت في التقارب التاريخي لحقب إنشائها، وقيمتها الأثرية والتصنيفية العالية، إلى جانب استيعابها لوظيفة "الإقامة السكنية أو الفندقية"

(سواء كاستخدام أصيل أو مستحدث بعد التأهيل المعماري)، فضلاً عن تنوعها الجغرافي لتوفير رؤية شمولية تخدم أهداف البحث.

8-1- الحالة الدراسية الأولى: بناء كامبريدج هاوس في لندن:

8-1-1-البُعد التاريخي والبرنامج الوظيفي للمشروع:

شُيّد مبنى "كامبريدج هاوس (Cambridge House) "في الأصل كمنشأ سكني، ثم خضع لسلسلة من التحولات الوظيفية؛ حيث استُخدم ك نادٍ بحري وعسكري في الفترة الممتدة بين عامي 1865 و1999، واكتسب خلالها تسميته الشهيرة "نادي الدخول والخروج (In and Out Club) "نسبةً للافتات المرورية المنظمة لحركة المركبات في فنائه الأمامي. ويحتل المبنى موقعاً استراتيجياً متميزاً في شارع "بيكاديللي" بالعاصمة البريطانية. [24]



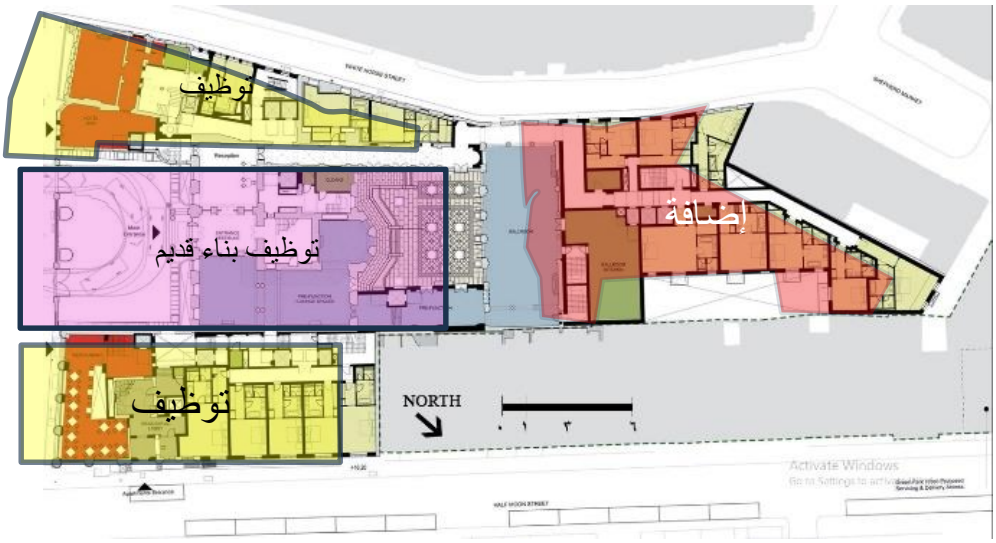


الصورة (1) يمين: رسم توضيحي لمنزل كامبريدج[5] عام 1764، مثالًا نادرًا على طراز "الفندق الخاص، وهو نمط معماري مميز للتصميم الفرنسي في القرن 17. **الصورة (2)**، يمين موقع المباني رقم 94 و95 في شارع بيكاديللي، و12 في شارع وايت هورس، و42 في شارع هاف مون، و90-93 في شارع بيكاديللي. [30]

وبعد فترة ركود استمرت لعقدين من الزمن، تطلّب تأهيله المعماري استراتيجيات ترميمية دقيقة بدأت بأعمال التثبيت والتدعيم الإنشائي قبل الانتقال للمراحل التنفيذية والتشطيبات الفراغية لتهيئة المبنى لوظيفته المستحدثة. وتُعد مدينة لندن بيئة غنية بنماذج التوظيف التكيُّفي الرائدة، وهو ما جسده معرض "لندن المتكيفة (Adaptive London) "الموسوم بـ "إعادة استخدام المباني القائمة"، والذي شكّل جزءاً من برنامج بحثي وفعاليات موسعة استكشفت آليات التحديث والتطوير المرن، وعُرضت مخرجاته في مركز لندن المعماري[24]

[5]في مجلة "أخبار لندن المصورة" الصادرة في أكتوبر 1865 .المصور / DEA :مكتبة أمبروزيانا / غيتي إيميجز

8-1-2-الموقع والجوار العمراني للحالة الدراسية: يمتد المشروع على مساحة 18,000 متر مربع، مستهدفاً توظيفاً تكيفياً يدمج بين السكن الخاص وفندق بـ 102 غرفة ومطعم. وتجلت المرونة الإنشائية في المباني (90-93) بيكاديللي عبر الإبقاء على الواجهات التاريخية وممرات الحركة الرئيسية مع إزالة الهيكل الداخلي، بينما فرض تصنيف المبنى رقم (94) كأثر من الدرجة الأولى قيوداً صارمة لصون زخارفه وجصياته لحمايتها. وقد شملت التدخلات الهندسية لشركة "ديكونستركت" أعمال تدعيم مؤقتة، وهدم مدروس، وتوسعات متعددة المستويات تحت الأرض، وصولاً إلى دمج الهياكل القائمة مع كتل خرسانية مسلحة مستحدثة تضمن استدامة المبنى وديمومته الكلية.



المخطط (3)، مسقط عام للمشروع يظهر فيها توظيف البناء القديم (الأصفر) والإضافات (الأحمر)، والجزء القائم(بنفسجي). studiopdp[6] [25]

8-1-3-منهجية التأهيل والتوظيف التكيُّفي للمنشأ:

استبقت أعمال التأهيل عملية توثيق ومسح تفصيلي شامل للأصول القائمة بالتنسيق مع مكتب التراث وستمنستر، بهدف حصر الأضرار الإنشائية وتحديد مواطن القيمة المعمارية الواجب صونها. وارتكزت المنهجية على تحقيق توازن دقيق يتيح دمج التقنيات والتحسينات البيئية المعاصرة عبر تراتبية تدخل

[6] ستوديو**PDP** ، المعروف سابقًا باسم Paul Davis + Partners أوPDP London ، هو مكتب هندسي معماري مقره المملكة . تأسس عام 1994، وتقاعد رئيس مجلس إدارته بول ديفيس من منصبه كرئيس مجلس إدارة في عام 2013. تتمحور مشاريع المكتب في التفاعل مع السياق، وتطبيق أفكارًا جديدة .

تدرجت بين الحفاظ والترميم، ثم إعادة البناء، وصولاً للإزالة كخيار أخير. وفي هذا السياق، استُهدفت المناطق التي فقدت أصالتها التاريخية والجودة الأصلية لفراغاتها كأجزاء مقبولة للتدخل المعماري الحديث؛ كالفراغات المتضررة من قصف عام 1940، حيث أُعيد بناء أسقفها هندسياً لدمج منظومة العزل وتحسين الأداء الحراري للغلاف الخارجي. كما شمل التطوير إزالة المباني غير المدرجة وتطعيم الموقع بعناصر مُستحدثة تتناغم مع النسيج التاريخي؛ في حين حُققت المرونة البيئية والصوتية عبر دمج توازن مدروس بين الزجاج الثانوي في الفراغات عالية الأهمية والزجاج المزدوج في المناطق الأقل حساسية تراثياً. ولتجاوز تحدي دمج الخدمات الميكانيكية والكهربائية المعاصرة، اعتمد الفريق الهندسي بالتعاون مع "هيئة التراث الإنجليزي[7]" Historic England وشركة AKT II[8] قراراً استراتيجياً يقضي بتوجيه التدخلات التقنية الكبرى نحو النطاقات الفراغية الأدنى أهمية وقيمة، مما يضمن صون الهوية البصرية واستدامة المبنى دون المساس بأصالته المادية. (حديث مع المعمار ، Jokin Asiain[9] كعضو في الاستديو [29]

8-1-4-كفاءة مشروع "كامبريدج هاوس" في تحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري:

يُجسّد مشروع إعادة تأهيل "كامبريدج هاوس" نموذجاً تطبيقياً رائداً لفلسفة الاقتصاد الدائري في قطاع التشييد، عبر استثمار استراتيجية التدوير المغلق للمواد في العمليات الهندسية الممتدة فوق وتحت مستوى الأرض. وتجلت هذه المقاربة الدائرية في تبني شركة "ديكونستركت"[10] لمنهجية إعادة استخدام العناصر الإنشائية المعدنية في مسارين متكاملين: من "مؤقت إلى مؤقت" ومن "مؤقت إلى دائم". ويظهر هذا التميز بوضوح في مشروع ترميم واجهة المباني (90-93) بيكاديللي؛ حيث جرى استثمار المرونة المادية للمواد لإعادة تدوير وتوظيف حوالي 75 طناً من أصل 480 طناً من الهياكل الفولاذية المستصلحة من مشاريع هدم سابقة في برج "ميديوس هاوس(Medius House Tower) "، إلى جانب دمج هذه المكونات المدورة مع نظام التسقيف الفولاذي الدائم والمستحدث في الطابق الرابع للمنشأ التراثي، مما أسهم في خفض مستويات استهلاك المواد البكر، وترشيد الطاقة الكامنة، والحد من البصمة الكربونية الكلية للمشروع[26] .

البناء الأصلي

[7] هيئة حكومية رسمية تملك صلاحيات قانونية وتنظيمية ومستشارين هندسيين معنية بتصنيف المباني والموافقة على التدخلات المعمارية.

[8] شركة استشارات هندسية إنشائية وتصميم واجهات بريطانية شهيرة عالمياً، ومقرها الرئيسي في لندن.

[9] **Jokin Asiain** جوكين آسيين وهو مهندس معماري معتمد من المعهد الملكي للمعماريين البريطانيين (RIBA) في مجال الحفاظ على التراث متخصص بالتراث والمباني المدرجة، وعلم الآثار، وتقنيات البناء التقليدية، ويقدم المساعدة والمشورة فيما يتعلق بقضايا الحفاظ على التراث .

[10] شركة متخصصة في أعمال التمكين في بريطانيا تقدم حلول امل باستخدام مواد محلية واسعة النطاق



الصورة (3): واجهة المشروع بعد التعديل والإضافات وإعادة الاستخدام. [26]

8-2- الحالة الدراسية الثانية: مستشفى "لو شاتو دو ليرتفورد (Le Château de Hertford)" البريطاني بفرنسا:

8-2-1- البُعد التاريخي والبرنامج الوظيفي للمشروع:

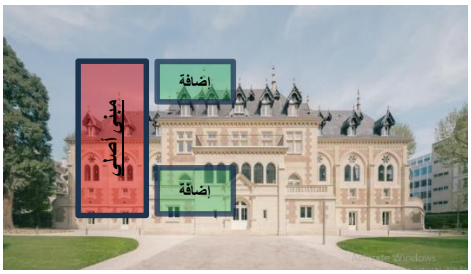
شُيّد مبنى مستشفى "هيرتفورد" البريطاني في منطقة "ليفالوا-بيريه" (باريس الكبرى) بين عامي 1877 و1879 على يد المعماري "بول إرنست سانسون(Paul-Ernest Sanson)[11] "، متبنياً طرازاً قوطياً جديداً مستوحى من العمارة الإنجليزية؛ حيث شغل وظيفة صحية استقبلت المرضى البريطانيين لعقود، ولا سيما جناح الولادة الذي استمر نشاطه التشغيلي حتى نهاية القرن العشرين. وقادت وكالة "مود كوبيه (Maud Caubet)[12] "للهندسة المعمارية استراتيجية إعادة تأهيل شاملة للموقع نيابة عن "صندوق هيرتفورد البريطاني الخيري(HBCF)[13] "، ارتكزت على صون أصل وفلسفة الهوية التاريخية للمكان وتطويعها بمرونة لاستيعاب وظائف معاصرة مستحدثة. ويضم القصر حالياً حزمة أنشطة تكيفية تشمل قاعات تدريب، وفضاءات عمل مشتركة، ومرافق لتناول الطعام، صُممت جميعها ضمن بيئة مرنة، يسهل الوصول إليها، ومنفتحة حيوياً على النسيج الحضري للمدينة.

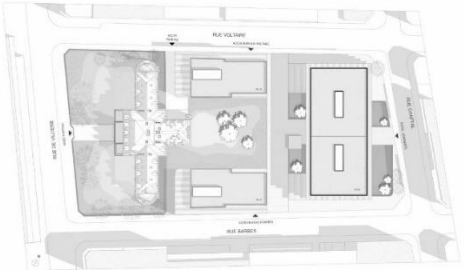
---

[11] مهندسًا معماريًا فرنسيًا، التحق بمدرسة الفنون الجميلة في باريس في سن الثامنة عشرة، ودرس على يد إميل جيلبير .بعد حصوله على شهادته عام ١٨٦١، تدرب أولًا في مكتب دينيس-لويس ديستور وشارل-أوغست كويستيل، ثم أنطوان-نيكولا بايلي، الذي أوكل إليه عام ١٨٦٥ . سرعان ما اكتسب سانسون شهرة واسعة بين الأرستقراطيين والطبقة البرجوازية العليا بفضل قصوره ومنازله الباريسية الفخمة.

[12] مود كوبيه معمارية فرنسية 1978 تتبنى عملية إبداعية حدسية ومتطورة باستمرار. تستمد إلهامها من العالم الخارجي لتؤدي دورها كمهندسة معمارية، وهو دور تؤكد عليه باستمرار في عملها: معالجة القضايا البيئية من خلال التكيف مع سياق كل مشروع .ترى مهنتها حجر الزاوية لجودة الحياة والتحول البيئي .تلتزم بخلق "الجمال" لضمان استدامة المباني. تنطوي المهنة على مسؤولية المساهمة في تطوير عمارة تعكس مجتمعاً متنوعًا وديناميكيًا.

[13] La Hertford British Charitable Fund

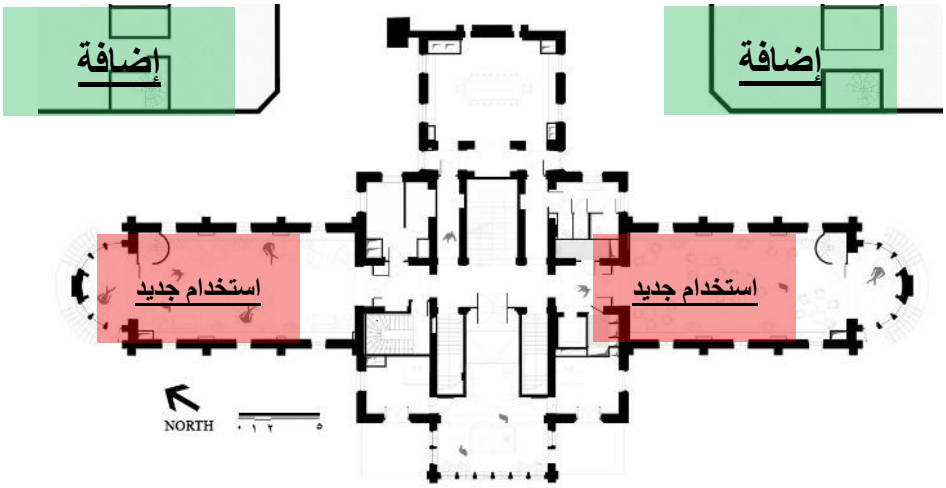




الصورة (4): واجهة عامة للمبنى بعد تغيير الوظيفة إلى مستشفى. [28]. **المخطط (4):** موقع عام للبناء يبين الإضافات ضمن الموقع باللون الأخضر. [27]

8-2-2- منهجية التأهيل والتوظيف التكيُّفي للمنشأ:

ارتكزت استراتيجية العمل على توثيق تاريخي معمق ومسوحات استقصائية للمخططات والمحفوظات الأصلية لفهم التحولات البنيوية للقصر وإعادة بناء شكله الأساسي. وبدلاً من الاستنساخ التقليدي، طرحت وكالة "مود كوبيه (Maud Caubet) "رؤية تصميمية مرنة تُبرز العناصر الأثرية وتلبي الاشتراطات الوظيفية المعاصرة؛ حيث جرى ترميم واجهات الحجر والطوب بمواد مطابقة للأصل، واستُبدلت نوافذ (PVC) بمكونات عالية الأداء البيئي حافظت على الهوية البصرية عبر توظيف الخشب الفاتح للنوافذ المستطيلة والفولاذ الأسود للأقواس المدببة، بالتوازي مع استعادة التصميم الأصلي لباب المدخل العائد لعام 1879. أمَّا داخلياً، فقد أُعيد تشكيل الفراغات لدمج عناصر الحركة الحديثة كأدراج الطوارئ والمصاعد المحدثة ومنحدرات التسهيل الحركي دون المساس بالحجم التاريخي الفراغي للمبنى. وتحقيقاً لمعايير الاستدامة، طُبّق العزل الحراري من الداخل مع تدعيم إنشائي انتقائي للهيكل، وتوظيف مواد مستدامة من مصادر حيوية وجيولوجية(Geo- and Bio-based Materials) ، مما حقق ترشيداً عالي الكفاءة في استهلاك الطاقة التشغيلية مع الحفاظ على وضوح وقيمة الهيكل التراثي الأصلي. [15]



المخطط (5)، مسقط أفقي للطابق الأرضي يبين مرونة تغيير الفراغات الداخلية للوظيفة الجديدة (كفرش) مع الحفاظ على الهيكل الأساسي الخارجي. [28]

8-3- الحالة الدراسية الثالثة: فندق قصر جاسر – بيت لحم – فلسطين

8-3-1- البُعد التاريخي والبرنامج الوظيفي للمشروع:

بُني "قصر جاسر" التاريخي في مدينة بيت لحم عام 1910 بتكليف من "سليمان جاسر" (رئيس بلدية بيت لحم الأسبق)[14]، ليشغل حيزاً سكنياً مخصصاً لإقامة عائلته. ويُعد القصر واحداً من أبرز شواهد العمارة الفلسطينية التقليدية في مطلع القرن العشرين، حيث تبرز أهمية دراسته في سياق البحث كنموذج إقليمي (عربي) يجسد مرونة المنشآت الحجرية التاريخية وقابليتها للتحول نحو قطاع الضيافة والتوظيف الفندقي المعاصر، محققاً معادلة التوازن بين صون الأصالة المعمارية المحلية وتحقيق استدامتها الاقتصادية والثقافية.[23] شُيّد في الفترة الممتدة بين عامي 1910 و1914، حيث عكس بتفاصيله المعمارية المكانة الاجتماعية والخيرية لمالكه "سليمان جاسر". ويمثل المبنى نموذجاً تطبيقياً استثنائياً لـ "**المرونة التراكمية "للأبنية التراثية عبر التاريخ**؛ نظراً لسلسلة التحولات الوظيفية الحادة والمتعاقبة التي استوعبها هيكله الإنشائي بنجاح. فقد تحول القصر من مسكن خاص إلى مقر للجيش البريطاني، ثم

[14] **سليمان جاسر** (1992 - 1908)هو رجل أعمال فلسطيني شغل منصب رئيس بلدية بيت لحم من عام 1948 إلى عام 1959، معروف بأعماله الخيرية في منطقة بيت لحم بالضفة الغربية. ولد سليمان يوسف إبراهيم جاسر لعائلة مسيحية فلسطينية، صاحب أكبر شركات المقاولات في فلسطين. كرّس جاسر نفسه لمساعدة الفقراء والمحتاجين في مجتمعه، أسس عدة جمعيات خيرية منها: صندوق سليمان جاسر الخيري، وفندق قصر جاسر الذي يوفر فرص عمل وتدريب للسكان المحليين

استُخدم كسجن للنساء في أربعينيات القرن العشرين. ومع مطلع الخمسينيات، أظهر المبنى مرونة فراغية عالية باستيعابه للقطاع التعليمي؛ حيث شُغل كمدرسة خاصة حملت اسم "الأمة"، قبل أن يتحول لاحقاً إلى مدرسة حكومية عامة للبنين ثم للبنات، وصولاً إلى محطته الاستثمارية المعاصرة التي تمثلت في إعادة تأهيله وتوظيفه كفندق فاخر، مما يبرهن على حيوية هذا الأثر وقابليته المستمرة للتكيُّف الدائم مع التغيُّرات السياسية، والاجتماعية، والاقتصادية المحيطة به. [[22] [15]

اكتسب القصر أهمية تاريخية وجغرافية استثنائية نظراً للموقع الاستراتيجي الذي يشغله بالقرب من معالم دينية بارزة، فضلاً عن فرادَة عناصره وتفاصيله المعمارية والزخرفية المتبعة في تصميمه الأصلي، مما جعله أصلاً تراثياً محمياً يحمل قيماً حضارية وبصرية تتطلَّب مرونة تصميمية دقيقة وحذرة عند تطبيق استراتيجيات التأهيل والتوظيف التكيُّفي المعاصر لضمان عدم المساس بأصالته المادية.[20] بناه المعماري الفلسطيني مرقص نصار[16].





الصورة (5): واجهة شرقية رئيسية للقصر عام 2011. [20]– **الصورة (6):** صورة لفناء القصر تم تحويله لقهوة رواق.[20]

8-3-2- منهجية التأهيل والتوظيف التكيُّفي للمنشأ:

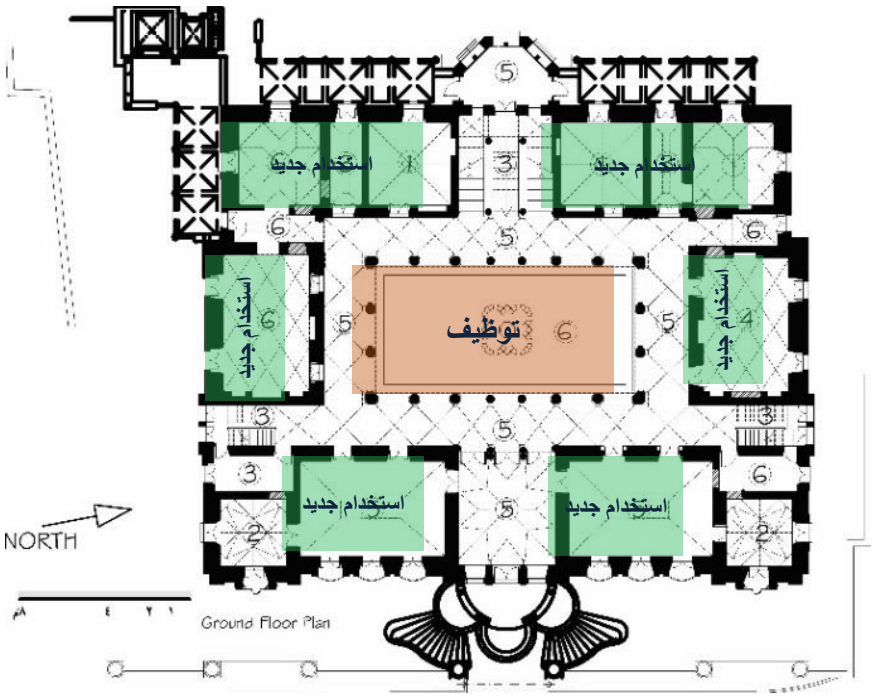
يتألف القصر تاريخياً من ثلاثة طوابق، بمسطح إنشائي يبلغ 800 متر مربع لكل طابق. وقد خضع لعملية تأهيل وتوظيف فندقي شاملة عام 1998 بتمويل من مستثمرين فلسطينيين عبر شركة "باديكو " (PADICO)[17]الاستثمارية. وتجلت المرونة الخارجية والتوسعية للمشروع في الاستحواذ على النطاق العقاري الخلفي للقصر بمساحة 35 دونماً ودمجه مع النسيج التاريخي؛ مما أتاح زيادة الكفاءة التشغيلية للمنشأ ليتضمن اليوم 250 غرفة وجناحاً رئاسياً، إلى جانب مرافق ترفيهية تشمل حوض سباحة، ومنتجعاً

[15]صحيفة القدس العربي - قصر جاسر من منزل لإطعام الفقراء لسجن بريطاني لمدرسة وصولاً إلى فندق يحصد لقب «أفضل فندق تاريخي في العالم « 11 اوكتوبر 2017 ،

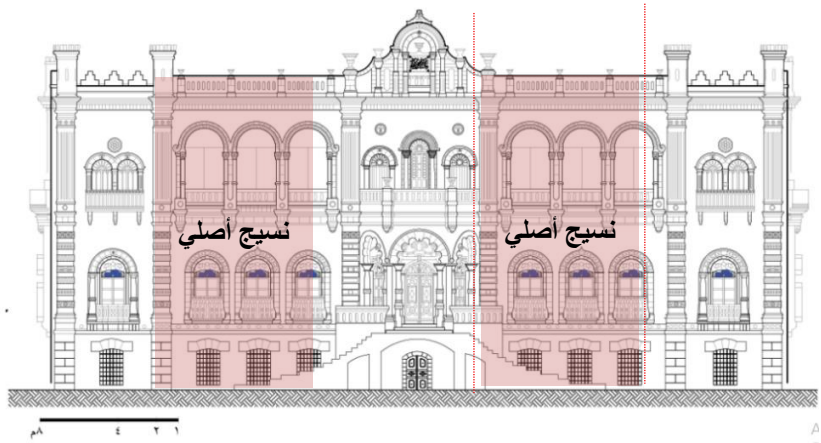
[16]**مرقُص نصّار** (1937 - 1872)معماري فلسطيني .يُعتبر أحد رموز فن العمارة في فلسطين منذ بدايات القرن العشرين. ارتبط اسمه بالعديد من القصور والأديرة والمباني العامة في بيت لحم والقدس وغيرها من المدن الفلسطينيّة. ولقد زاوجت أعماله بين العمارة المحليّة، والحداثة المتأثرة بالعمارة الغربيّة آنذاك.

[17]باديكو القابضة (PADICO) (شركة فلسطين للتنمية والاستثمار)، وهي أكبر مجموعة استثمارية فلسطينية خاصة تأسست عام 1993، وتهدف لتطوير الاقتصاد الفلسطيني عبر الاستثمار في قطاعات حيوية مثل العقارات والمال والاتصالات، وتضم آلاف المستثمرين الفلسطينيين، وهي تعمل كذراع استثماري رئيسي ومحرك للتنمية في فلسطين، وتستثمر في شركات كبرى تابعة لها .

صحياً، وقاعات مؤتمرات. وبفضل هذه المقاربة التكيفية المرنة التي وازنت بين صون كتلة الأثر الأصلية والتوسع الأفقي الخارجي الكفء، تحول القصر إلى أحد أكبر الفنادق الاستثمارية المستدامة في فلسطين، وضمن تصنيفاً رياديا بفئة الخمس نجوم كأصل ثقافي وسياحي. [22] .



المخطط (6): مخطط قصر جاسر بعد تحويله لفندق يتضح أنه تم الحفاظ على الهيكل الأساسي للبناء وتم إعادة توظيف الفراغات الداخلية. حيث تُمنع الإضافات الحديثة على المباني التي تُصنف تراثية.[5]



الشكل (1): الواجهة الشرقية (الدخول) لقصر جاسر (حفاظ على الواجهة بشكل كامل).[5]

يمتلك القصر الآن منيب المصري. تسعى إدارة الفندق لتسجيله على **قائمة التراث العالمي** وإنشاء متحف بداخله [22].

8-4- التقييم والتحليل المقارن للمخرجات التطبيقية:

بعد الانتهاء من التوصيف التاريخي والمعماري للحالات المدروسة، يركز هذا المحور على إجراء دراسة تحليلية تقاطعية لتقييم كفاءة ومخرجات منهجيات التوظيف التكيُّفي المطبقة في الحالات الثلاث السابقة. ويستهدف هذا التحليل اختبار مدى امتثال التدخلات الهندسية المنفذة لمعايير المرونة والاستدامة، ورصد أكثر الممارسات كفاءة في صون الأصالة المادية للمنشآت التراثية وتلبية المتطلبات التشغيلية المعاصرة، لتشكل دليلاً مرجعياً يسهم في تطوير آليات التعامل مع الحالة الدراسية المحلية:

يُظهر التقييم التحليلي المقارن تصدّر الحالة الدراسية الأولى (مشروع كامبريدج هاوس) في تفعيل المعدلات الأعلى من منهجيات التوظيف التكيُّفي، وهي النسبة الأكثر كفاءة في تحقيق قيم المرونة المعمارية وتعزيز مستويات الاستدامة الشاملة للمنشأ. وفي سياق هذا التقييم البصري، تم استخدام **الترميز باللون البنفسجي** للإشارة تحديداً إلى حزمة الممارسات والتدخلات الهندسية التكاملية التي استهدفت تطبيق معايير المرونة والاستدامة معاً وفي آن واحد؛ مما يبرز نقاط التماس الجوهرية بين تطويع الفراغ التاريخي وصون طاقته وموارده المادية عبر الزمن.

الجدول (2): تقييم تحليلي مقارن للحالات العالمية المدروسة وفق الجدول (1):

استراتيجيات التأهيل والتوظيف التكيفي	حالة 1 عالمية	حالة2عالمية	حالة 3 عربية
قابلية التوسع والابتكار	–	–	√
تطيل عمر البناء	√	√	√
تغيير الوظيفة	√	√	√
تحويل المبنى القائم إلى وظيفة تلبي المتطلبات الحديثة	√	-	-
تحويل المبنى التراثي للتكيف مع أغراض جديدة	√	√	√
الحفاظ على أكبر قدر ممكن من الهيكل الأصلي	√	√	√
استراتيجية حاسمة لتحقيق الاستدامة	√	–	–
تقلل من نفايات الهدم	√	√	√
إعادة استخدام الطاقة الكامنة	√	√	√
توفير مزايا بيئية واجتماعية واقتصادية متنوعة	√	√	√
الاستفادة من المساحات وقدرتها على التعديل	√	-	-
وسيلة فعالة لتحسين الكفاءة التشغيلية	√	√	√
الاستجابة للمتطلبات الحالية	√	√	-
الأصالة وصمود البناء التراثي	√	√	√
الحفاظ على الموروث بشكل مستدام	-	√	-
دمج الطاقات المتجددة	-	-	-
الحفاظ على القيمة الثقافية	√	√	√
استخدام مستدام للموارد الثقافية واستخدام مواد متوافقة مع الأصل	√	√	√
مشاركة مجتمعية وتنسيق مع أصحاب المصلحة ومرونة القوانين	√	-	-
الاستخدام المستمر الذي يتكيف مع الوقت	√	√	-
تعدد الوظائف وتنوع المستخدمين	√	-	-
الاقتصاد الدائري وتطبيق مبادئ التصميم المستدام والتصميم المرن	√	-	-
	19/22 **تحقيق 7 من أصل 7**	15/22 **تحقيق 4 من أصل 7**	12/22 **تحقيق 3 من أصل 7**

المصدر: إعداد الباحثة بالاستناد إلى المراجع:[2] [10] [12] [17]

يُقدّم الجدول الإحصائي السابق تحليلاً مقارناً وشاملاً للحالات المدروسة؛ حيث أظهرت الحالة الدراسية الأولى (لندن) الامتثال الأعلى عبر تحقيقها لـ 19 بنداً من أصل 22 من المؤشرات المعتمدة في البحث، مسجلةً علامة كاملة بنسبة (7 من 7) في النطاقات التطبيقية التي تدمج بين مفهومي المرونة والاستدامة

معاً. وفي المقابل، حققت الحالة الدراسية الثانية كفاءة متوسطة بتلبية 15 بنداً من أصل 22، وبمعدل تحقق بلغ 4 بنود من أصل 7 في المحاور المشتركة للمرونة والاستدامة. بينما سجلت الحالة الدراسية الثالثة النسبة الأدنى بتحقيق 12 بنداً من أصل 22، وبواقع 3 بنود فقط من أصل 7 في المؤشرات التكاملية. وبناءً على هذه المعطيات الرقمية، يتأكد تصدر الحالة الأولى كنموذج تطبيقي كفوء، هو الأكثر مرونة وقدرة على تعزيز أبعاد الاستدامة المعمارية للأصل التراثي. ***لم تتبنى أي من الحالات السابقة لتقنية التوائم الرقمية***

8-5- الحالة الدراسية المحلية: مركز رضا سعيد للمؤتمرات بدمشق 1899م (مشفى الغرباء سابقاً):

8-5-1- البُعد التاريخي والبرنامج الوظيفي للمشروع:

يعود تاريخ تشييد المنشأ إلى العهد العثماني عام 1318هـ / 1900م؛ حيث شغل وظيفته الطبية الأولى تحت مسمى "مشفى الغرباء" أو "المشفى الوطني" إبان فترة الانتداب الفرنسي. ويتميز المبنى بخصوصية إنشائية ومادية تتجلى في بنائه من الحجر والقرميد، واعتماد مسقط أفقي على شكل حرف .(U) وقد خضع الأثر لاستراتيجية إعادة تأهيل شاملة تحولت بها وظيفته نحو قطاع التعليم والتبادل المعرفي، وحمل المركز اسم الدكتور "رضا سعيد[18]" تكريماً لذكراه وتأسيسه للجامعة السورية. وتجلَّت **المرونة الخارجية والتصميمية** في المشروع عبر إضافة كتلة وسطية مستحدثة عند الترميم وظفت كقاعة رئيسية متعددة الاستعمالات على كامل الفراغ المحيط بالبناء، مع الالتزام التام بحدود الحفاظ وصون المظهر البصري والشكل التاريخي الأصلي للأثر. وبفضل هذه المقاربة التكيفية الكفوءة، بلغت المساحة الإجمالية للمشروع بعد التأهيل المعماري 3960 متر مربع لكتلة البناء بطوابقها المتعددة، و3440 متر مربع للموقع العام[21] .

[18]مؤسس الجامعة السورية.

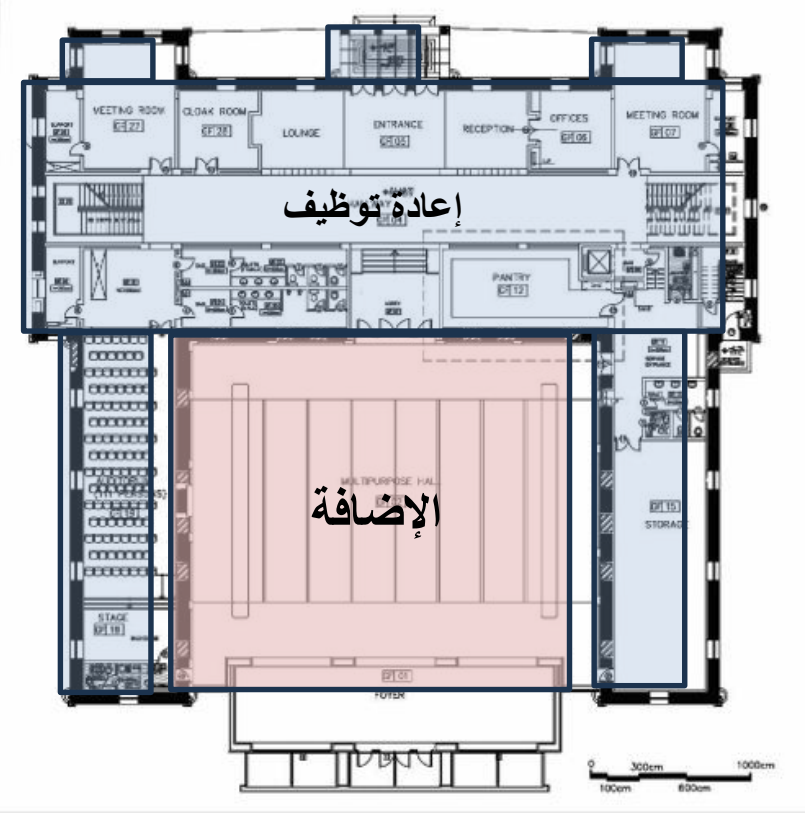




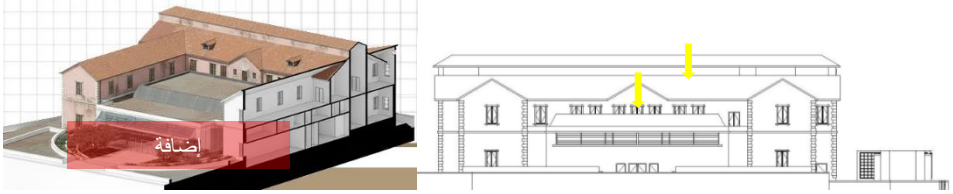
الصورة (7) يمين: رئاسة جامعة دمشق قبل الترميم، توثيق خالد معاذ– **الصورة (8) يسار:** البناء بعد التأهيل وإعادة الاستخدام. [31]

8-5-2- التوزيع الفراغي والقدرات الاستيعابية للمركز

اعتمدت استراتيجية التأهيل المعماري للمركز نهجاً مرناً يضمن صون الأصالة المادية للمظهرين الخارجي والداخلي معاً، بالتوازي مع تطويع الفراغات هندسياً لتستجيب لمتطلبات قطاع المؤتمرات والتبادل المعرفي. وتتجلى المرونة الفراغية والتشغيلية للبناء في تجهيز قاعة رئيسية متعددة الاستخدامات زُوّدت بأحدث الأنظمة الصوتية والمرئية المتطورة لتستوعب ما يصل إلى 300 شخص، مدعومة بمسرح يتسع لـ 110 أشخاص، وأربع قاعات اجتماعات فرعية تتراوح طاقتها الاستيعابية بين 16 و25 شخصاً وفقاً لطبيعة التوظيف والتشكيل الفراغي المتغير. وفي المقابل، استثمر الطابق الأول هذه المرونة الوظيفية لاستيعاب الجناح الإداري الذي يضم مكاتب رئاسة جامعة دمشق، بالإضافة إلى قاعة الاجتماعات الرئيسية المخصصة لمجلس الجامعة بطاقة استيعابية تبلغ 35 شخصاً. [21]



المخطط (7): مسقط أفقي للطابق الأرضي تظهر التصاق الكتلة بالواجهة الجنوبية للبناء.[31] وتعديل الباحثة



الصور(9-10). التصاق الكتلة بالواجهة الجنوبية للبناء- تظهر في المنظور والواجهة. [6]

تجلت كفاءة التطويع الفراغي في استجابة أبعاد ومساحات أجنحة الإقامة القديمة للمحددات المعاصرة للوظيفة الإدارية المستحدثة؛ حيث وفّرت البنية الهندسية الأصلية للمشروع مرونة كافية لاستيعاب هذا التحول بيسر ودون إخلال بالنسيج المادي. وضماناً لاستدامة الأثر وديمومته التشغيلية والبيئية، يمتلك المركز مخططاً متكاملاً لإدارة الموقع العام وغلافه الخارجي، مدعوماً بمعدات صيانة تخصصية متنوعة وفريق فني مؤهل ومُدرّب على إدارة وتشغيل كافة الأنظمة والشبكات التقنية المستحدثة، ولا سيما منظومة

التكييف والتهوية المركزية(HVAC) ، وذلك استناداً إلى خطط صيانة دورية ووقائية ممنهجة تضمن كفاءة الأداء الوظيفي وتمنع تدهور البناء بمرور الوقت.[19]

8-5-3- التحليل الإحصائي ومخرجات تقييم الحالة المحلية:

يُظهر التقييم الإحصائي المرصود في الجدول (3) الخاص بـ "مركز رضا سعيد للمؤتمرات بدمشق" تلبية المنشأ لـ 11 بنداً من أصل 22 من المؤشرات المعتمدة لمنهجيات التوظيف التكيُّفي، محققاً كفاءة موازية بواقع 4 بنود من أصل 7 في المحاور المشتركة التي تدمج بين مفهومي المرونة والاستدامة معاً. وفي سياق هذا التقييم البصري، تم استخدام الترميز باللون الأحمر للإشارة تحديداً إلى حزمة الممارسات والتدخلات الهندسية التكاملية التي استهدفت تطبيق معايير المرونة والاستدامة بشكل متزامن؛ مما يبرز الفرص والتحديات التطبيقية التي واجهت تطويع هذا الأثر وضمان كفاءته التشغيلية والبيئية عبر الزمن. الباحثة

الجدول (3): تقييم الحالة المحلية وفق نتائج الدراسة النظرية:

استراتيجيات التأهيل والتوظيف التكيفي	تقييم الحالة المحلية
قابلية التوسع والابتكار	–
تطيل عمر البناء	√
تغيير الوظيفة	√
تحويل المبنى القائم إلى وظيفة تلبي المتطلبات الحديثة	–
تحويل المبنى التراثي للتكيف مع أغراض جديدة	√
الحفاظ على أكبر قدر ممكن من الهيكل الأصلي	–
استراتيجية حاسمة لتحقيق الاستدامة	–
تقلل من نفايات الهدم	√
إعادة استخدام الطاقة الكامنة	**√**
توفير مزايا بيئية واجتماعية واقتصادية متنوعة	–
الاستفادة من المساحات وقدرتها على التعديل	**–**
وسيلة فعالة لتحسين الكفاءة التشغيلية	√
الاستجابة للمتطلبات الحالية	–
الأصالة وصمود البناء التراثي	**√**
الحفاظ على الموروث بشكل مستدام	√

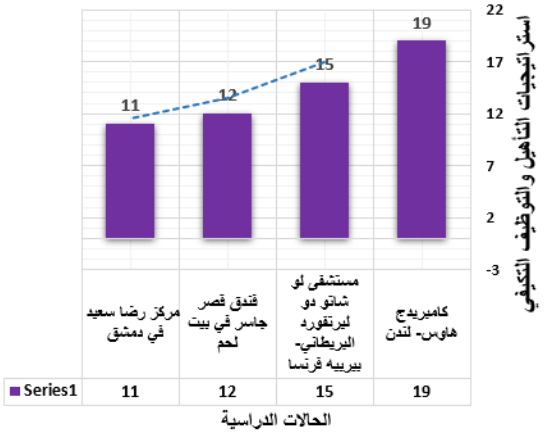
[19] الباحثة بالاستعانة المهندس، بشار الموصللي: مدير الصيانة والتشغيل في المبنى.

دمج الطاقات المتجددة	–
الحفاظ على القيمة الثقافية	√
استخدام مستدام للموارد الثقافية واستخدام مواد متوافقة مع الأصل	√
مشاركة مجتمعية وتنسيق مع أصحاب المصلحة ومرونة القوانين	–
الاستخدام المستمر الذي يتكيف مع الوقت	√
تعدد الوظائف وتنوع المستخدمين	–
الاقتصاد الدائري وتطبيق مبادئ التصميم المستدام والتصميم المرن	–
	11/22 تحقق 4 من أصل 7

المصدر: إعداد الباحثة بالاستناد إلى المراجع [2] [10] [12] [17]

8-6- النتائج التحليلية: توصل البحث من خلال تحليل النماذج إلى النتائج التالية:

1. يُلخص المخطط البياني رقم (8) مخرجات التقييم والتحليل المقارن بين الحالات الدراسية الأربعة (العالمية والإقليمية والمحلية)، مستعرضاً كفاءة كل حالة في امتثال التدخلات الهندسية المنفذة لمعايير المرونة والاستدامة. ويُظهر التحليل البياني تصدّر الحالة الدراسية الأولى (لندن) والحالة الدراسية الثانية (باريس) كمنشأين أكثر مرونة في استيعاب التغيير وتحقيق الاستدامة والاقتصاد الدائري، يليهما قصر جاسر، ثم مركز رضا سعيد للمؤتمرات بدمشق كحالة محلية تفتح آفاقاً لتطوير آليات التدخل المرن في البيئة التراثية السورية.



المخطط (8): مخطط بياني لنتيجة تقييم الحالات الأربع. حيث يظهر أنَّ الحالة الأولى والثانية الأكثر مرونة في استيعاب التغيير وتحقيقاً لأبعاد الاستدامة والاقتصاد الدائري. إعداد الباحثة

2. أثبتت النتائج تميُّز حالة مدينة لندن كنموذج للتكيف المستدام، نظراً لمرونة القوانين المنظمة للتعامل مع الأبنية التاريخية، إلى جانب تفعيل الشراكات مع القطاع الخاص، لتحقيق توازن بين الحفاظ على الهوية التراثية والجدوى الاقتصادية.
3. تشابهت استراتيجيات التكيُّف في حالتَي فرنسا وفلسطين من خلال التركيز على المرونة في تخطيط الموقع العام؛ إذ اعتمدت الحالتان على تلبية متطلبات الوظيفة الجديدة عبر "الإضافة المعمارية المدروسة ضمن الموقع" بدلاً من التعديل على جسم المبنى، وهو ما عزَّز الحفاظ على الشكل الأصلي للبناء مدعوم بأطر قانونية تمنع التدخل المباشر في الهيكل التراثي.
4. بيَّن تقييم الحالة المحلية منهج جيد في إعادة الاستخدام التكيفي؛ من خلال امتلاك المبنى مرونة بيئية كامنة مستمدة من جودة تصميمه الأصلي، مما ساعده على تحقيق بنود الاستدامة بكفاءة عالية، وجعله مؤهلاً لاستيعاب التدخلات التكيفية دون خلل بيئي.
5. تشابهت الحالة المحلية مع نموذج "كامبريدج هاوس "في اعتماد حل "تماس مباشر بين الكتلة المضافة والبناء الأساسي"، وهو توجّه يقلل نسبياً من معيار الحفاظ الكلي على النسيج الأصلي؛ وفي المقابل، ظهرت مرونة قيود الموقع في حالتَيْ "قصر جاسر" و"مستشفى هيرتفورد "كعامل حاسم فرض الحفاظ على الهيكل كاملاً، وتوجيه التوسع وملاءَمة الوظائف الجديدة وفقاً لمحددات الفراغ الخارجي المحيط.
6. أكدَّ البحث أنَّ مرونة التشريعات والقوانين هي المحرك الأساسي لحجم ونوع التدخل في مشاريع التكيُّف؛ فبينما تقود القوانين الصارمة (كما في فرنسا وفلسطين) إلى حصر الاستخدام التكيفي في "مواءمة الكتلة الداخلية للمبنى الأصلي" لحماية قيمته التاريخية، تتيح المرونة القانونية المدروسة هوامش أوسع للمصممين لإعادة تفعيل الفراغات بما يلائم المتطلبات المعاصرة دون المساس بالأصالة.
7. توصل البحث (من خلال تحليل الحالتين الأولى والثالثة) إلى وجود علاقة عكسية بين درجة الحرية في اختيار مواد حديثة ومستوى التصنيف الأثري للمبنى؛ فبينما تنخفض مرونة التدخل المادي في

مباني الفئة أ لتفرض التجديد بمواد مطابقة للأصل، تتسع هذه المرونة في مباني الفئة ج لتمنح المصمم حرية أكبر في إعادة البناء والترميم باستخدام مواد وتقنيات حديثة.

9- النتائج العامة:

1. ضرورة تبني مفهوم المرونة التصميمية كأداة رئيسية تصميمية لتحقيق الاستدامة في مشاريع إعادة الاستخدام التكيفي في المباني التراثية.
2. تمثل مرونة التعامل مع الفراغات المعمارية وقابليتها للتعديل المحور المغذي للاقتصاد الدائري، وذلك من خلال استغلال الطاقة الكامنة للمبنى، وضمان أصالة وصمود الهيكل الإنشائي، تزامناً مع توافر مرونة التشريعات والقوانين.
3. يغطي محور الاقتصاد الدائري ثلاثة أبعاد متكاملة طاقة المواد الكامنة وصون المواد التقليدية والتفكيك والعكوسية الإنشائية والمرونة المستقبلية للأثر.
4. يسهم التكيُّف المرن في تعزيز استدامة المبنى التراثي عبر إطالة العمر الافتراضي للمنشأة، وتسهيل تغيير الوظيفة مع صون النسيج الأصلي، والحدّ من نفايات الهدم والبناء.
5. هناك ارتباط وثيق بين مفهوم المرونة وقدرة المبنى التراثي على استيعاب "تغيير الوظيفة"؛ حيث تتيح المرونة الفراغية تعدُّد الوظائف وتنوع المستخدمين، ما يضمن حيوية المبنى واستمرارية تشغيله.
6. تشكل الوظيفة الأصلية للمبنى التراثي محدداً رئيسياً لمرونته الاستيعابية؛ حيث تبين وجود علاقة طردية بين "التقارب التصميمي والهيكلي" للوظيفتين (القديمة والجديدة) وسهولة تطويع الفراغات المعمارية، مما يرفع من كفاءة إعادة الاستخدام التكيُّفي ويقلّل من حجم التدخلات الإنشائية المطلوبة.
7. يتيح تبني **التوأم الرقمي** اختبار "سيناريوهات المرونة والتكيُّف" افتراضياً قبل البدء بالتدخل المادي الملموس؛ حيث يُمكّن المصممين من تقييم استجابة الهيكل الإنشائي القديم للوظائف المُعاصرة، وتحديد الكفاءَة والمواقع المثلى لأنظمة الطاقة دون الإضرار بالنسيج الأصلي.

10- التوصيات:

- يوصي البحث بتفعيل التدخلات العكوسة والقابلة للتفكيك من خلال تصميم القواطع الداخلية بشكل يمكن إزالتها وتغيير الوظيفة مستقبلاً دون إلحاق الضرر بالنسيج الأصلي للمبنى التراثي في دمشق.
- يدعو البحث الجهات التنظيمية والمسؤولة عن التراث إلى تطوير القوانين العمرانية ومنحها مرونة موَّجهة تتناسب طردياً مع مستويات التصنيف الأثري للمباني.
- يوصي البحث باستثمار الطَّاقة الكامنة للمواد من خلال أفضلية خيارات الترميم والتأهيل التكيُّفي المرن للأبنية الدمشقية المهجورة كبديل عن الهدم أو الإهمال.
- يوصي البحث بتحفيز ممارسات الاقتصاد الدائري من خلال التشجيع على إعادة استخدام مواد البناء التقليدية ما يضمن خفض البصمة الكربونية للمشاريع التراثية وإطالة عمرها الافتراضي
- يوصي البحث بتأسيس بنك محلي للمواد التراثية تحت إشراف مديرية الآثار والمحافظة لتجميع وإعادة تدوير العناصر الإنشائية والمعدنية والخشبية الناتجة عن مشاريع الترميم والهدم القانونية، وإعادة توظيفها "من مؤقت إلى دائم" في تدعيم الأبنية المتضررة بدمشق القديمة.
- نظراً لخلو الحالات الدراسية السابقة من تطبيق تقنية التوائم الرقمية ونظراً لأهميتها في الاستخدام التكيفي، يوصي البحث بضرورة دمج هذه التقنية كأولوية في المشاريع المستقبلية للأبنية التراثية.

11- مقترحات:

- إجراء بحوث تفصيلية تركز على "تحديد وتصنيف أجزاء المنشأ التراثي" (الهيكل الإنشائي، القواطع الفراغية، الأغلفة الخارجية) القابلة لتطبيق حلول المرونة والتعديل دون المساس بالهوية.
- **تطوير** واختبار نماذج محاكاة لقياس مدى كفاءة الإجراءات المرنة المقترحة وأثرها الكمي على مؤشرات الاستدامة أثناء عمليات إعادة الاستخدام التكيفي، لتشكل هذه المسارات النواتين التأسيسيتين للأبحاث القادمة.



أجزاء البناء القابلة لتطبيق مفهوم المرونة. إعداد الباحثة

12- المراجع:

[1]. جازية، الفيلالي (2025)، ***أدوات وأساليب حفظ وتأهيل التراث المعماري واستدامته***، مجلة الساورة للدراسات الإنسانية والاجتماعية، المجلد 11، العدد 21، الجزائر.

[2]. رحمة، عفاف– آدم، زاهر (2021)، ***الحفاظ على المباني التراثية والتاريخية في المدن وإعادة استخدامها***، مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع، العدد (67)، الإمارات العربية المتحدة.

[3]. عبد الرحمن، علي (2024)، ***إعادة تأهيل واستخدام المباني التراثية***، مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، المجلد التاسع، العدد 11، ورقة المؤتمر الدولي الرابع عشر (التراث الحضاري بين التنظير والممارسات)، مصر.

[4]. طنوس، وعد، المهنا، زياد، فاكوش، عقبة (2011)، ***المرونة التصميمية كإحدى أهم معايير السكن الاقتصادي***، مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، دمشق.

[5]. مركز حفظ التراث التاريخي، (2015)، ***دليل الحفاظ على المركز التاريخي لمدينة بيت لحم***، برعاية منظمة اليونسكو، ومجموعة من المؤسسات المحلية (بلدية رام الله وبيت لحم)، بيت لحم، فلسطين.

[6]. ورشة عمل لطلاب الدراسات العليا عام 2026 – توثيق المباني التاريخية في مدينة دمشق

[7]. AlKhansari, M. (2018), ***Toward a convergent model of flexibility in Architecture***, Journal of architecture and urbanism, vol 42, issue 2, Lithuania. VILNIUS.

[8]. AIA (The American Institute of Architects (2023/2024), ***Building that last: Design for adaptability deconstruction and reuse***, guide, Washington, DC .

[9].Conejos, S., Langston, C., & Smith, J. (2014). ***Designing for better building reuse***. *Design Studies*, 35(4), 381-401.

[10]. Davies, O., Brisibe,W.G.& Davies, LEE. (2024), ***challenges to implementation of Adaptive Reuse of Heritage Buildings***, International Journal of architectural heritage, Vol 7, issue 2, Philadelphia, US.

[11]. Dişli, G. & Ankaralıgil, B. (March 2023), ***Circular economy in the heritage conservation sector***: An analysis of circularity degree in existing buildings, Sustainable Energy Technologies and Assessments journal, vol 56, science direct, https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103126

[12]. DJEBBOUR, I. & Wided BIARA, R., (2021), ***The Challenge of Adaptive reuse towards the sustainability of heritage buildings***, INTERNATIONAL JOURNAL OF CONSERVATION SCIENCE, Volume 11, Issue 2. Romania.

[13]. Farokhifirouzi, H. (2019) ***A review on flexibility in Architectural design***, International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, vol 10, No 6, THAILAND.

[14]. **Foster, G. (2020)**. ***Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts. Resources, Conservation and Recycling,*** 152, 104507. doi.org.

[15]. GRAS, E. (2023/2024), ***TRABAJO FINAL DE MÁSTER DE INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS***, Master degree, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, France.

[16]. Jevremović, L., Stanojević, A., Antić, U., Đorđević, I. & Milojković, A. (2025), ***Adaptive reuse of industrial mills – balancing heritage protection and new use***, Synergy of Architecture and Civil Engineering, conference paper, Niš, Serbia.

[17]. Mansoury, M. (2024), ***Sustainable Conservation of Heritage Buildings***, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH ON PLANNING AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, VOLUME 6, ISSUE 1 , Egypt.

[18]. Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). ***Historic Building Information Modelling (HBIM)***. *Structural Survey*, 31(2), 114-131.

[19]. Nadolny, A., Mehsen, A. & Safaei, S. (2024), ***the importance of flexibility in adaptive reuse of industrial heritage***: learning from Iranian cases, international journal of conservation science, vol 12, issue 1, Iasi – ROMANIA.

[20]. **https://ar.wikipedia.org**

[21]. موقع جامعة دمشق **https://damascusuniversity.edu.sy**

[22]. - صحيفة القدس العربي **https://www.alquds.co.uk**

[23]. - دار يوسف نصري جاسر للفنون والبحوث **https://darjacir.com/News-and-Mag**

[24]. **https://nla.london/insights/adaptive-london-reusing-existing-buildings**

[25]. Studio PDP – **https://studiopdp.com**

[26]. Deconstruct company – **https://www.deconstructuk.com/projects/cambridge-house-piccadilly/**

[27]. **https://maudcaubet.com** – موقع المعمارية مود كوبييه

[28]. **https://www.archdaily.com**

[29]. https://www.consandheritage.co.uk/articles/cambridge-house-hotel-and-residences

[30]. **https://www.buildington.co.uk**

[31]. مديرية الشؤون الهندسية في جامعة دمشق

" مساهمة في تطوير علاقة تحليلية لحساب مقاومة القص في الجوائز البيتونية المدعمة بالألياف الفولاذية باستخدام شبكة ذكاء اصطناعي ANN "

طالب الدكتوراه: سعيد هاشم سعيد
قسم : الهندسة الإنشائية – كلية : الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية
اشراف الأستاذ الدكتور المشرف : أ.د أكرم صقور
الدكتور المشرف المشارك : أ.د غاندي جحجاح

□ الملخّص □

يهدف هذا البحث إلى تطوير علاقة تحليلية مرجعية لحساب مقاومة القص في الجوائز الخرسانية المسلحة بالألياف الفولاذية ($SFRC$) باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وفيها تم جمع قاعدة بيانات تضم 88 تجربة معملية من المرجعيات السابقة، شملت 11 متغيراً هندسياً وميكانيكياً رئيسياً (أبعاد الجائز، نسبة التسليح الطولي، نسبة فضاء القص إلى العمق الفعال، مقاومة الخرسانة، خصائص الألياف)، ولتقييم أداء العلاقات التحليلية الشائعة، حُسب عامل الأداء (نسبة المقاومة التجريبية إلى المحسوبة) لكل علاقة، وأظهرت النتائج أن علاقتي Darwish و2Ashour كانتا الأقرب إلى القيم التجريبية ضمن قاعدة البيانات المستخدمة، ثم تم تصميم شبكة عصبية اصطناعية (ANN) ببنية ($1 - 18 - 11$)، باستخدام خوارزمية Levenberg–Marquardt، ودُرّبت على 73 حالة واختُبرت على 15 حالة حجزت مسبقاً من قاعدة البيانات نفسها ولم تستخدم في تدريب الشبكة، حيث حققت معامل ارتباط (R) قدره 0.960 في مرحلة الاختبار وبقيت الأخطاء النسبية ضمن حدود 5% للحالات المختبرة، بعد التحقق من أداء الشبكة استُخدمت مخرجاتها لتوليد 5000 نقطة بيانات مولدة عددياً من مخرجات الشبكة ضمن نطاق البيانات المدروسة، ثم طُبق تحليل الانحدار المتعدد غير الخطي لمعايرة أربعة ثوابت ضمن صيغة Darwish، (A=0.52, B=10, C=0.7, D=1.23) مما أتاح اشتقاق

علاقة تحليلية، وقد أظهرت هذه العلاقة المطورة تحسناً جيداً مقارنة بالعلاقة الأصلية، حيث أظهرت العلاقة المطوّرة تحسناً في متوسط عامل الأداء بنسبة 17.4%، وانخفاضاً في معامل الاختلاف (COV) بنسبة 17.9%، وارتفاعاً في معامل التحديد (R^2) بنسبة 6.9% مقارنة بالعلاقة الأصلية لـDarwish، كما أظهر تحليل الحساسية باستخدام مؤشرات التأثير الكلي (Total-Order Sobol Indices) أن نسبة القص إلى العمق الفعال كانت العامل الأكثر تأثيراً بنسبة 23.4%، تليها النسبة الحجمية للألياف الفولاذية بنسبة 19.8%، ثم مقاومة ضغط الخرسانة بنسبة 15.2% ونسبة التسليح الطولي بنسبة 12.7%. كما أظهر تحليل التفاعلات وجود تأثير مشترك بارز بين a/d وVf ، مما يؤكد أهمية التأثيرات التفاعلية بين المتغيرات في التنبؤ بمقاومة القص."وتُعد العلاقة المقترحة خطوة بحثية أولية، وتقتصر صلاحيتها على الجوائز المستطيلة غير المزودة بتسليح قص عرضي (كانات)، ضمن النطاقات التجريبية التي تغطيها قاعدة البيانات، ولا يُوصى بتطبيقها خارج هذه الحدود أو على الجوائز المزودة بتسليح عرضي أو الجوائز T دون تحقق تجريبي مستقل.

الكلمات المفتاحية: شبكات عصبية اصطناعية، مقاومة القص، جوائز خرسانية مسلحة، ألياف فولاذية، علاقة تحليلية مطورة.

"Contribution to the Development of an Analytical Relationship for Calculating Shear Strength in Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Using an Artificial Neural Network (ANN)"

ABSTRACT

This research aims to develop a reference analytical relationship for calculating the shear strength of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams using artificial intelligence techniques. A database of 88 experimental tests was compiled from previous references, encompassing 11 key geometric and mechanical variables (beam dimensions, longitudinal reinforcement ratio, shear span-to-effective depth ratio, concrete strength, and fiber properties). To evaluate the performance of common analytical relationships, the performance factor (ratio of experimental to calculated resistance) was calculated for each relationship. The results showed that the Darwish and Ashour2 relationships were the closest to the experimental values within the used database. An artificial neural network (ANN) with an (11-18-1) architecture was then designed using the Levenberg-Marquardt algorithm, trained on 73 cases, and tested on 15 cases that were pre-reserved from the same database and not used in network training, achieving a correlation coefficient (R) of 0.960 in the testing phase with relative errors remaining within 5% for the tested cases. After validating the network's performance, its outputs were used to generate 5000 data points numerically generated from the network outputs within the range of the studied data. Nonlinear multiple regression analysis was then applied to calibrate four constants within the Darwish formula, yielding (A=0.52, B=10, C=0.7, D=1.23), which enabled the derivation of an analytical relationship. This developed relationship showed notable improvement compared to the original equation, with the average performance factor improving by 17.4%, the coefficient of variation (COV) decreasing by 17.9%, and the coefficient of determination (R^2) increasing by 6.9% relative to the original Darwish relationship. Sensitivity analysis using Total-Order Sobol Indices revealed that the shear span-to-effective depth ratio (a/d) was the most influential factor at 23.4%, followed by the steel fiber volume fraction (Vf) at 19.8%, concrete compressive strength (f'c) at 15.2%, and longitudinal reinforcement ratio (ρ) at 12.7%. Interaction analysis also revealed a

significant combined effect between a/d and Vf, confirming the importance of interaction effects between variables in predicting shear strength. The proposed relationship is considered a preliminary research step, and its validity is limited to rectangular beams without transverse shear reinforcement (stirrups), within the experimental ranges covered by the database. It is not recommended to apply it outside these limits or to beams with transverse reinforcement or T-beams without independent experimental verification.

Keywords: Artificial Neural Networks, Shear Strength, Reinforced Concrete Beams, Steel Fibers, Enhanced Analytical Relationship.

مقدمة:

تعد مقاومة القص من الآليات المعقدة في العناصر الخرسانية المسلحة، نظراً لتداخل عدد كبير من العوامل الهندسية والميكانيكية في تحديد سلوك العنصر عند بلوغ الحالة الحدية، وتزداد هذه الصعوبة في الجوائز المسلحة بالألياف الفولاذية نتيجة التفاعل بين مساهمة الخرسانة، والتسليح الطولي، والعمل القوسي، ومساهمة الألياف في نقل القوى عبر الشقوق المائلة وقد أسفر ذلك عن تباين في نتائج العلاقات التحليلية، حيث اقترحت الدراسات السابقة عدداً من العلاقات التجريبية وشبه التجريبية لتقدير مقاومة القص في الجوائز الخرسانية المسلحة بالألياف الفولاذية، من أبرزها علاقات Sharma، Narayanan and Darwish، Ashour et al، Khuntia et al، Kwak et al. وقد أظهرت فروقاً بين القيم المتوقعة والنتائج التجريبية، وتتميز هذه العلاقات بأنها تستند إلى نتائج تجريبية، إلا أن اختلاف صيغها وعدد المتغيرات الداخلة فيها يؤدي إلى تفاوت في قدرتها على تمثيل البيانات التجريبية المختلفة ولذلك، من الممكن أن يشكل استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وبخاصة الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، أمراً مساعداً لتمثيل العلاقات غير الخطية بين المتغيرات الهندسية والميكانيكية ومقاومة القص، حيث يهدف البحث الحالي إلى الاستفادة من قدرة الشبكات العصبية على تمثيل العلاقات غير الخطية، ثم تحويل هذا التمثيل إلى علاقة تحليلية مبسطة وتتكون المنهجية من ثلاث مراحل رئيسية: (1) تجميع قاعدة بيانات تجريبية وتحليل العلاقات السابقة، (2) بناء وتدريب شبكة عصبية اصطناعية للتنبؤ بمقاومة القص، (3) استخدام مخرجات الشبكة العصبية لتطوير علاقة تحليلية ضمن صيغة Darwish.

1- قاعدة البيانات التجريبية:

تم تجميع 88 حالة اختبارية من الدراسات المنشورة حول مقاومة القص للجوائز الخرسانية المسلحة بالألياف الفولاذية وشملت المصادر دراسات Sharma، و Narayanan and Darwish، و Ashour et al، و Khuntia et al، و Sahoo et al، و Shoaib et al، و Arslan et al، وغيرها من الدراسات المبينة في قائمة المراجع. وتجدر الإشارة إلى أن هذه البيانات مأخوذة من دراسات تجريبية متعددة، ولذلك فإن اختلاف ظروف الاختبار والأجهزة والخلطات وخصائص المواد بين المراجع يمثل مصدراً محتملاً للتشتت التجريبي، وقد تم التعامل مع ذلك من خلال توحيد الواحدات والرموز والمعاملات الداخلة في الحسابات، مع الإبقاء على البيانات ضمن المجالات التي يمكن مقارنتها بصورة مباشرة، ويوضح الجدول (1) النطاقات الكاملة للمتغيرات الإحدى عشر التي تشملها قاعدة البيانات، مع قيم المتوسط والانحراف المعياري لكل متغير، ويُظهر هذا الجدول تنوع البيانات المدروسة، مع الإشارة إلى أن بعض المتغيرات تتركز ضمن نطاقات معينة، مما يستدعي الانتباه إلى حدود صلاحية النموذج المطور.

الجدول (1): النطاقات الإحصائية للمتغيرات المدروسة (على أساس 88 حالة)

المتغير	الرمز	الوحدة	المدى	المتوسط	الانحراف المعياري
عرض الجائز	bw	mm	85–300	162.4	58.7
ارتفاع الجائز	h	mm	150–700	312.8	125.4
العمق الفعال	d	mm	130–622	285.3	112.5
طول الجائز	L	mm	720–4500	2129.6	1050.3
نسبة التسليح الطولي	ρ	%	0.5–4.0	2.3	0.72
نسبة a/d	a/d	–	1.13–4.50	3.02	0.87
قطر الركام الأعظمي	da	mm	9.6–22.0	12.8	4.2
مقاومة الضغط	f'c	MPa	23.9–60.2*	38.7	18.2
النسبة الحجمية للألياف	Vf	%	0.25–1.5	0.78	0.56
عامل شكل الألياف	Lf/df	–	50–133	71.2	18.5
مقاومة شد الألياف	Ften	MPa	834–2300	1135.2	320.4

تشير هذه الحدود إلى أن العلاقة المقترحة ليست علاقة عامة لجميع أنواع الخرسانة والجوائز، وإنما علاقة محددة المجال مشتقة من قاعدة البيانات المستخدمة، ولا يُنصح بتطبيق العلاقة خارج هذه النطاقات قبل إجراء تحقق تجريبي مستقل، وسيتم مناقشة ذلك بالتفصيل في القسم الخاص بحدود الصلاحية

2- العلاقات التحليلية السابقة:

تعددت العلاقات المقترحة لحساب مقاومة القص الحدية وتنوعت تبعاً لنوع العناصر والخلطة البيتونية المستخدمة وإضافاتها، وقد تمت مراجعة أهم العلاقات الشائعة التي استخدمت في المرجعيات السابقة، وسوف نستعرض بعض هذه العلاقات:

علاقة الباحث $Sharma$ [1]:

طور الباحث Sharma (1986) علاقة تجريبية لحساب مقاومة القص الحدية للخرسانة العادية (بدون ألياف) بالاعتماد على مقاومة الشد بالفلق للخرسانة f_{ct} على نسبة فضاء القص إلى العمق الفعال a/d

$$v_n = (k * f_{ct}) * \left(\frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

حيث: $f_{ct} = 0.79 * \sqrt{f'_c}$ k= 2,

علاقة $Narayanan\ and\ Darwish$ [2]:

اقترح الباحثان علاقة تجريبية لحساب اجهاد القص الحدي تتضمن ثلاثة محددات هي مقاومة الشد بالفلق والعمل القوسي للجائز ونسبة التسليح الطولي واجهاد الشد للألياف على طول شق القص القطري:

$$v_n = e * \left(0.24 * f_{ct} + 80 * \rho * \frac{d}{a}\right) + v_b \quad (2)$$

يعبر العامل e عن تأثير العمل القوسي للجائز ويعطى بالشكل التالي:

$$e = 1 \quad for \left(\frac{a}{d} > 2.8\right), \qquad e = 2.8 * \frac{d}{a} \quad for \left(\frac{a}{d} \leq 2.8\right) \quad (3)$$

تعطى علاقة مقاومة الشد بالفلق f_{ct} بالاعتماد على تحليل الانحدار الإحصائي للنتائج التجريبية بالشكل:

$$f_{ct} = \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0.7 + \sqrt{F} \ldots (Mpa) \qquad F = V_f \frac{L_f}{D_f} \beta \quad (4)$$

حيث: f_{cuf}: المقاومة المكعبية على الضغط (Mpa) F: عامل الليف، V_f: النسبة الحجمية للألياف، L_f: طول الليف (mm)، D_f: قطر الليف (mm)، β: عامل التماسك ويعتمد على شكل الليف الهندسي ويساوي 0.5 للألياف المستقيمة الدائرية، و0.75 للألياف المتعرجة، و1 للألياف ذات النهايات المعقوفة، لم يحسب عامل الليف بالاعتماد على النسبة الحجمية للألياف $V_f\%$ وعامل الشكل $\frac{L_f}{D_f}$ فقط بل على عامل التماسك β، ρ: نسبة التسليح الطولي b: عرض المقطع (mm) d: الارتفاع الفعال (mm).

القسم الثالث من العلاقة V_b هو مقاومة سحب الليف على طول الشق القطري المائل بزاوية 45° ويعطى بالعلاقة التالية:

$$V_b = 0.41 \tau V_f \frac{L_f}{D_f} \beta \quad (5)$$

حيث: τ اجهاد التماسك ويساوي 4.15 Mpa (القيمة مقترحة من قبل $swamy\ et\ al - 1974$)

علاقة [3] $Ashour, Hasanain, and\ Wafa$:

عدل Ashour et all (1992) علاقة Zsutty (1968) للبيتون العادي بإدخال عامل الليف F لتصبح للبيتون المسلح بألياف فولاذية بالشكل التالي:

$$V_n = \left(2.11 \sqrt[3]{f_c'} + 7F\right) \sqrt[3]{\rho \frac{d}{a}} \ldots\ldots\ldots (MPa) \ for \ \frac{a}{d} \geq 2.3 \quad (6)$$

$$V_n = \left[\left(2.11 \sqrt[3]{f_c'} + 7F\right) \sqrt[3]{\rho \frac{d}{a}} \frac{2.5d}{a} + V_b \left(2.5 - \frac{d}{a}\right) \ldots\ldots (MPa) \ for \ \frac{a}{d} < 2.3 \right. \quad (7)$$

إن المعاملات vb, f هي نفسها الموجودة في علاقة $Narayanan\ and\ Darwish$ (1987)، واقترحوا أيضاً تعديل علاقة الكود الأمريكي ACI −318 Eq (11−5) بإضافة عامل الليف f وباستخدام تحليل الانحدار الإحصائي لتصبح بالشكل التالي:

$$V_n = \left(0.7\sqrt{f_c'} + 7F\right)\frac{d}{a} + 17.2\rho\frac{d}{a} \qquad (8)$$

علاقة $Khuntia, Stojadinovic\ and\ Goel$ [4]:

اقترح الباحثون علاقة تأخذ بالحسبان عامل الليف بالاعتماد على تطوير علاقة الكود الأمريكي ACI 318، تم حساب مساهمة الألياف بالاعتماد على مقاومة الشد بعد التشقق بفرض أن إجهاد التماسك بين الليف والمونة الاسمنتية $\tau = 0.68 * \sqrt{f`c}$ والتقدير العمودي للشق القطري مساوياً 0.9xd وأدخل تأثير العمل القوسي للجوائز بإدخال العامل e إلى العلاقة كما يلي:

$$V_n = (0.167e + 0.25F)\sqrt{f_c'} \qquad (9)$$

$$e = 1 \quad for\ \left(\frac{a}{d} \geq 2.5\right), \qquad e = 2.5 * \frac{d}{a} < 3 \quad for\ \left(\frac{a}{d} \leq 2.5\right) \qquad (10)$$

f_c': المقاومة المميزة للبيتون (MPa)، F: عامل الليف وهو ذاته الموضح سابقا في علاقة درويش

علاقة Kwak et al [5]:

عدل الباحث Kwak et al (2002) علاقة Zsutty (1968) لحساب تأثير قوة الشد على العمل القوسي مع حد إضافي خاص بالألياف لحساب المساهمة المباشرة للألياف في مقاومة القص في الجوائز المسلحة بألياف فولاذية بدون أساور.

$$V_n = 3.7 * e * f_{ct}^{2/3}(\rho\frac{d}{a})^{1/3} + 0.8V_b \qquad (11)$$

$$e = 1 \quad for\ \left(\frac{a}{d} > 3.4\right), \qquad e = 3.4 * \frac{d}{a} \quad for\ \left(\frac{a}{d} \leq 3.4\right) \qquad (12)$$

مقاومة الشد بالفلق f_{ct} تحسب من العلاقة المذكورة سابقاً:

$$f_{ct} = \left(\frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0.7 + \sqrt{F}\right) \qquad (13)$$

جميع المعاملات هي المذكورة في علاقة درويش

3- تقييم العلاقات السابقة واختيار العلاقة الأساسية للتطوير:

تم تقييم العلاقات السابقة باستخدام قاعدة البيانات المكونة من 88 حالة، وحُسب لكل علاقة متوسط عامل الأداء (نسبة المقاومة التجريبية إلى المحسوبة)، والانحراف المعياري، ومعامل الاختلاف (COV)، ومعامل الارتباط (R)، ومعامل التحديد (R^2). ويوضح الجدول (2) هذه المعاملات.

الجدول (2): قيم المعاملات الإحصائية للعلاقات المقترحة سابقاً

المعامل الإحصائي	SHARMA[1]	DARWISH[2]	ASHOUR1[3]	ASHOUR2[3]	KHUNTIA[4]	KWAK[5]
AVERAGE	0.403	1.217	1.271	1.209	0.777	1.252
MAXIMUM	0.587	2.336	2.472	2.340	1.304	2.440
MINIMUM	0.200	0.380	0.381	0.380	0.219	0.380
ST-DEV-(N-1)	0.110	0.432	0.483	0.424	0.274	0.490
COEFF-OF VAR-(%)	27.32	35.49	37.98	35.09	35.23	39.14
R	0.65	0.85	0.86	0.85	0.78	0.86
R^2	0.42	0.72	0.74	0.72	0.61	0.74

أظهرت النتائج أن علاقة Darwish وعلاقة Ashour2 كانتا الأكثر ملاءمة للتطوير، نظراً لقرب متوسط عامل الأداء من الواحد (1.217 و1.209 على التوالي)، وانخفاض معامل الاختلاف مقارنة ببعض العلاقات الأخرى (35.49% و35.09% على التوالي)، مع قدرة تنبؤية جيدة ($R^2 = 0.72$ لكليهما). وقد تم اختيار علاقة Darwish أساساً للتطوير لكونها توفر صيغة تحليلية يمكن فصل مكوناتها الرئيسية، مما يسمح بمعايرة معاملات محددة مع الحفاظ على البنية الفيزيائية العامة للعلاقة.

4- بناء الشبكة العصبية الاصطناعية:

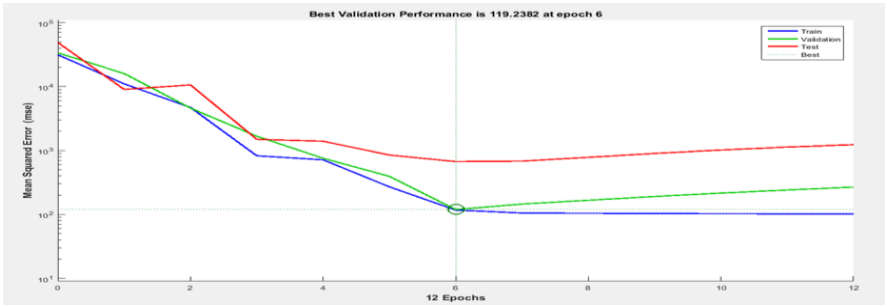
تم تصميم شبكة عصبية اصطناعية متعددة الطبقات من نوع التغذية الأمامية (Feedforward) مع خوارزمية الانتشار العكسي (Backpropagation)، باستخدام بيئة MATLAB تحتوي على (11 وحدة في طبقة الإدخال (تمثل المتغيرات المستقلة) – طبقة خفية واحدة – 18 عصبوناً في الطبقة الخفية – وحدة إخراج واحدة (تمثل مقاومة القص) – بنية الشبكة: (11–18–1))، استُخدمت فيها خوارزمية Levenberg–Marquardt في عملية التدريب، مع دالة تنشيط من نوع Tansig للطبقة المخفية ودالة خطية (Purelin) في طبقة الإخراج، وقد تم اختيار هذه المعلمات بعد سلسلة من التجارب على أعداد مختلفة من العصبونات في الطبقة الخفية، حيث يوضح الجدول (3) عمليات بناء وتدريب الشبكة باستخدام الماتلاب كما يظهر قيم معامل الارتباط R لكل من مرحلة التدريب والتحقق والاختبار، ومن الجدير بالذكر أننا استخدمنا تقنية Early Stopping أثناء التدريب للتغلب على صغر حجم العينة من البيانات، مع تقسيم البيانات إلى (تدريب، تحقّق، اختبار) بنسبة (15–15–70) على التوالي، هذا ويمكن أن نعتبر أن نتائج الشبكة مقبولة إذا كانت قيم معامل الارتباط كبيرة في جميع المراحل (التدريب – التأكد – الاختبار)، ومتقاربة في مرحلتي الاختبار والتأكد من عدم ظهور قيم غير مقبولة في فترة تكرار العمل في مرحلة التأكد، وعند تحقيق هذه الخصائص يمكننا القيام بعملية اختبار الشبكة لإيجاد قيم جديدة، وفي حال عدم الرضا عن أداء الشبكة لتوليد قيم جديدة، يمكننا تدريب الشبكة مرة أخرى Retrain، أو زيادة عدد العصبونات، أو زيادة نسبة بيانات التدريب من العدد الكلي للبيانات.

جدول (3): نتائج تدريب الشبكة لأعداد مختلفة من العصبونات

عدد العصبونات	R التدريب	R التحقق	R الاختبار	Overall R	التوقف بسبب
1	0.93745	0.89373	0.92648	0.93242	تحقق
5	0.97598	0.96637	0.95415	0.96522	تحقق
7	0.99028	0.9639	0.9442	0.97298	تحقق
9	0.99264	0.96514	0.9691	0.98222	تحقق

تحقق	0.98168	0.96791	0.95133	0.99141	**10**
تحقق	0.95493	0.96435	0.92692	0.99182	**12**
تحقق	0.98635	0.98592	0.93695	0.99265	**15**
تحقق	**0.98306**	**0.96006**	**0.98914**	**0.99002**	**18**
تحقق	0.96977	0.95809	0.94531	0.98273	**22**
تحقق	0.95882	0.94164	0.96533	0.99394	**25**
تحقق	0.97068	0.9256	0.97459	0.99126	**30**

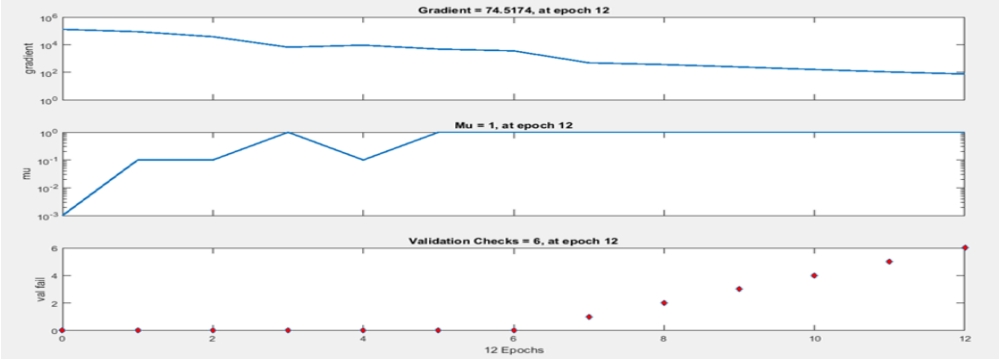
أظهرت النتائج أن 18 عصبوناً حقق أفضل توازن بين دقة التدريب وقابلية التعميم ضمن البيانات المتاحة، إلا أن هذا العدد ليس ثابتاً من الناحية النظرية، بل هو نتيجة معايرة عددية ضمن قاعدة البيانات الحالية، ولتجنب الإفراط في الملاءمة (Overfitting)، تم استخدام تقنية الإيقاف المبكر (Early Stopping) مع مجموعة تحقق منفصلة (Validation Set) تم حجزها عشوائياً بشكل مسبق من بيانات التدريب، وتُظهر النتائج تقارباً في قيم معامل الارتباط بين مراحل التدريب والتحقق والاختبار، مما يشير إلى غياب الإفراط الواضح في الملاءمة ضمن البيانات المتاحة. ومع ذلك، وبسبب الحجم المحدود نسبياً لقاعدة البيانات، فإن هذا لا يلغي الحاجة إلى تحقق خارجي مستقل باستخدام بيانات لم تدخل في بناء النموذج، أما عن أداء الشبكة فيوضح شكل(1) أقل قيمة لمتوسط مربع الخطأ MSE=119.2382 عند (6) دورات تكرارية.



شكل (1): أداء الشبكة العصبية خلال مراحل التدريب

ويظهر الشكل (2) أن المعامل ($M_u = 0.1$) حيث أن M_u هو القيمة الأولية للمعامل μ الذي يدخل في علاقة تحديث الأوزان تبعاً لتغير قيمة الخطأ، ميل تابع الخطأ $Gradient = 74.5174$ عند

عدد تكرارات $Epoch = 12$ والقيمة الأولية للمعامل μ الذي يدخل في تحديث الأوزان تبعاً لتغير قيمة الخطأ المعامل $(M_u = 1)$، وفي الأسفل عدد البارمترات الفعالة (عدد الأوزان والانحيازات) التي ساهمت في تدريب الشبكة $Validation\ Checks = 6$



شكل (2): عدد البارامترات الفعالة للشبكة

ويوضح الجدول (4) نتائج اختبار الشبكة على 15 حالة محجوزة مسبقاً بشكل عشوائي من قاعدة البيانات، حيث لم يتجاوز الخطأ النسبي 5% في جميع الحالات

الجدول (4): نتائج الحساب باستخدام ANN اعتماداً على مدخلات تجارب من المنشورات العلمية[15]...[6]

م	عرض الجائز Bw mm	ارتفاع الجائز h	العمق الفعال d	مجاز الجائز L span	نسبة التسليح p %	نسبة مجال القص إلى الارتفاع الفعال a/d	القطر الأعظمي da mm	المقاومة المميزة للبيتون	النسبة الحجمية لألياف Vf	عامل الشكل Lf/df	قوة الشد للألياف Ften Mpa	القيمة الحقيقية KN	القيمة المحسوبة KN	الخطأ النسبي %
1	85	150	130	1160	0.0205	3.02	9.6	30.6	0.5	133	2000	22	23.13	5%
2	152	455	381	2136	0.0196	3.44	10	38.1	1	55	1100	174	171.33	2%
3	152	455	381	2136	0.0263	3.44	10	49.2	1	80	1100	220	225.29	2%
4	205	685	610	3558	0.0152	3.5	10	29.6	0.75	80	1100	228	220.81	3%
5	152	254	221	2100	0.0239	2.5	10	34	0.5	60	1130	65	65.66	1%
6	152	254	221	2100	0.0239	3.5	10	34	0.5	60	1130	50	50.94	2%
7	150	225	197	1603	0.0136	2.8	20	29.1	0.5	60	1260	53	51.5	3%
8	300	700	570	5000	0.0287	2.98	18	60.2	0.75	86	2200	522	510.23	2%
9	140	375	340	1910	0.0167	2.5	19	36	1	60	1100	155	149.09	4%

10	120	200	167	720	0.0132	1.43	13	23.9	1.5	60	1100	85	81.58	4%
11	200	300	260	1800	0.0355	3.46	14	46.4	0.25	65	1100	111	113.91	3%
12	200	300	260	1800	0.0355	3.46	14	43.2	0.5	65	1100	121	124.19	3%
13	152	304	282	1524	0.0199	2.5	9.6	33.2	1	100	1100	146	147.58	1%
14	125	250	222	1200	0.0145	1.8	10	30	0.5	80	1225	79	80.01	1%
15	120	300	266	1100	0.0126	1.13	20	31.9	0.6	50	834	146	147.08	1%

5- تحليل حساسية المتغيرات:

أُجري تحليل الحساسية لتقييم الأهمية النسبية لكل متغير من المتغيرات الإحدى عشر في التأثير على مقاومة القص، ومن أجل ذلك تم توظيف طريقة سوبول العالمية(Sobol' Global Sensitivity Analysis) القائمة على تحليل التباين، حيث تنتج طريقة سوبول بطبيعتها مؤشرين أساسيين لكل متغير Xi:

- مؤشر التأثير الرئيسي(Si): ويقيس بدقة الجزء من التباين الكلي لمقاومة القص الذي يمكن أن يُعزى إلى تذبذب المتغير Xi بمفرده، بمعزل عن أي تأثيرات تفاعلية مع المتغيرات الأخرى.
- مؤشر التأثير الكلي (STi): ويُعبِّر عن إجمالي مساهمة المتغير Xi في التباين الكلي، شاملاً تأثيره المنفرد بالإضافة إلى جميع تأثيرات تفاعلاته المشتركة مع أي مجموعة من المتغيرات الأخرى.

كما جرى عملياً تقدير قيم STi من خلال محاكاة مونت كارلو وفق خوارزمية $Saltelli$ (2010)بالاستعانة بنحو $N = 5000$ عينة عشوائية مولَّدة ضمن النطاقات الفعلية للمتغيرات، ومن ثم تمريرها إلى دالة محاكاة الشبكة العصبية لحساب مخرجات القص، وتحليل مصفوفات العينات المتقاطعة لإيجاد التباينات الجزئية المطلوبة.

إن اعتماد STiبالتحديد لتمثيل "الوزن النسبي" يُعد اختياراً جيداً لأنه المؤشر الوحيد القادر على إدراك أهمية متغير قد يتوارى تأثيره المباشر خلف تفاعلات قوية والأهم من ذلك، أن مقارنة STi مع Si تُتيح استخلاصاً مباشراً لمدى هيمنة التفاعلات على سلوك النموذج، فكلما كبُر الفرق بينهما دلَّ ذلك على أن المتغير يُمارس تأثيره الأكبر عبر التفاعلات لا بشكل منعزل، وقد تجلّى ذلك عملياً بالتفاعل

التآزري القوي بين a/d و Vf الذي تم رصده، مما يُثبت قدرة هذه المنهجية على تحديد التفاعلات المميزة كمياً وربطها بتفسيرات فيزيائية، ويمثل الجدول (5) قيم STi مضروبةً في 100% لكل متغير مرتبةً تنازلياً، ومصنَّفةً ضمن فئاتها الوظيفية (هندسية – ألياف – مواد – تسليح)، وهي تفسَّر مباشرة على أنها الوزن النسبي للمتغير في حساسية النموذج النهائي، ومن السمات المهمة لهذه المؤشرات أن مجموعها يتجاوز 100% (ليبلغ قرابة 115%) ويعزى ذلك إلى احتساب مساهمات التأثيرات التفاعلية ضمن المؤشرات الكلية للمتغيرات، حيث تُحتسب هذه التفاعلات أكثر من مرة ضمن التأثيرات الكلية، وتؤكِّد هذه النتائج (المُتحقق منها أيضاً بتحليل أوزان الشبكة العصبية (خوارزمية جارسون)) أن العوامل الهندسية (نسبة a/d وأبعاد المقطع) تظل الأكثر هيمنة، يليها تأثير الألياف حجمياً وهندسياً، وهو ما ينسجم مع المبادئ الأساسية لميكانيك التصدع، ويوفر أساساً كمياً متيناً للفهم الفيزيائي للنموذج ولعملية تطوير العلاقة التحليلية التي ستُناقش لاحقاً.

جدول (5): الأهمية النسبية للمتغيرات الإحدى عشر

الترتيب	المتغير	الوزن النسبي(%)	الفئة	المبرر الرئيسي
1	a/d	23.4	هندسي	يحدد آلية الانهيار
2	Vf	19.8	ألياف	يحدد فعالية التدعيم
3	$f'c$	15.2	مواد	يمثل متانة الخرسانة
4	ρ	12.7	تسليح	يؤثر على توزيع الإجهادات
5	bw	9.3	هندسي	يحدد مساحة المقطع
6	Lf/df	8.5	ألياف	يؤثر على التماسك
7	d	7.1	هندسي	يحدد ذراع العزم
8	مقاومة الشد	6.3	ألياف	يحدد قدرة الحمل
9	قطر الحصويات	4.8	مواد	يؤثر على تداخل الحصويات
10	h	4.2	هندسي	يؤثر على تأثير الحجم
11	طول الفتحة	3.7	هندسي	يحدد توزيع القص

6- تأثيرات التفاعل بين المتغيرات:

تمت دراسة تأثير قيمة كل من نسبة حديد التسليح الطولي(ρi)، وقيمة امتداد القص/عمق العتبة (a/d) والمقاومة المميزة للبيتون($f'c$) والنسبة الحجمية للألياف (Vf %) وعرض الجائز (bw)على قيمة مقاومة القص في الجوائز الخرسانية غير المسلحة بتسليح قص عرضي (كانات)، ولوحظ أنه بزيادة قيمة (ρi) فإن قيمة مقاومة القص سوف تزداد تدريجياً، وأن نسبة التسليح لها تأثير أوضح بين ($\rho i = 2.3 - 3.4$) حيث تبدأ قيمة مقاومة القص بالتزايد تدريجياً أي أن تأثير (ρi) يكون واضحاً وذلك ناتج من تداخل تأثير العزم مع القص، ولوحظ أيضاً أن زيادة المقاومة المميزة للبيتون($f'c$) تزيد من تحمل الجائز لقوى القص، وهذه النتيجة متوافقة لما ورد في حميع المدونات حيث إن مقاومة القص تتناسب طرديا مع المقاومة المميزة للبيتون(fc')، كما أن زيادة كل من النسبة الحجمية للألياف (Vf %) وعرض الجائز(bw) تزيد من مقاومة القص للجائز، وفي إطار دراسة التفاعل بين العوامل المؤثرة على مقاومة القص، يبرز التفاعل التآزري بين النسبة الحجمية للألياف الفولاذية (Vf) ونسبة القص إلى العمق الفعال (a/d) باعتباره التفاعل الأكثر هيمنةً وتأثيراً على السلوك الإنشائي للجائز، حيث يتجلى التأثير المشترك في تغيير آليات مقاومة القص وتحسين كفاءة نقل الأحمال، فعندما تكون نسبة a/d منخفضة (أقل من 2.5)، تسيطر آليات القص المباشر، وتكون مساهمة الألياف في ذروتها من خلال تفعيل آليات التجسير المباشر للشقوق والتحكم في انتشارها في هذا النطاق، يؤدي زيادة Vfإلى تحسن ملحوظ في مقاومة القص، حيث تعمل الألياف على تعزيز صلابة المنطقة المضغوطة وتحسين انتقال القوى عبر القوس الداخلي بالمقابل، عندما تكون نسبة a/dعالية (أكبر من 3.5)، تتحول الهيمنة إلى آليات الانحناء، وتتغير طبيعة مساهمة الألياف نحو التحكم في تشققات الشد وإعادة توزيع الإجهادات في منطقة الشد، هنا يؤدي التفاعل بين Vf و a/d إلى تحسين متانة الجائز وزيادة طاقة الامتصاص قبل الانهيار، مما يحول السلوك من هش إلى لدن، كما يظهر التحليل أن التفاعل بين Vf و a/d ليس خطياً، بل يتميز بمناطق حرجة حيث تكون الاستجابة الإنشائية أكثر حساسية للتغير في أحدهما بوجود الآخر، هذه الديناميكية المعقدة تؤكد ضرورة مراعاة التفاعل التآزري بين هذين المتغيرين في النمذجة التنبؤية والتصميم الإنشائي.

7- تطوير العلاقة التحليلية

بعد تدريب نموذج الشبكة العصبية بنجاح، تم استثماره لتطوير علاقة تحليلية مبسطة تأخذ شكل العلاقة التي اقترحها Darwish كقالب أساسي، مع إدخال أربعة ثوابت محسنة (A,B,C,D) تمثل معاملات ضبط تُظهر مدى تأثير العوامل المختلفة في سلوك الخرسانة المسلحة بالألياف الفولاذية.

تعطى الصيغة الرياضية لها بالشكل التالي:

$$\boldsymbol{Vn = \left[A \cdot e \cdot f_{ct} + B \cdot \rho \cdot \frac{d}{a}\right] \cdot b_w \cdot d + C \cdot v_b} \qquad \textbf{(14)}$$

$$e = \begin{cases} 1 & if\ \frac{a}{d} > 2.8 \quad (15) \\ 2.8\frac{d}{a} & if\ \frac{a}{d} \le 2.8 \quad (16) \end{cases}$$

$$f_{ct} = \frac{f'c}{20 - \sqrt{F}} + D + \sqrt{F} \quad (17)$$

$$F = V_f \frac{L_f}{D_f}\beta \quad (18)$$

$$\mathbf{v_b = 0.41\ \tau V_f \frac{L_f}{D_f}\beta} \quad \textbf{(19)}$$

لتقدير الثوابت المحسنة (A,B,C,D) تم الاعتماد على الشبكة العصبية المدربة لتوليد قاعدة بيانات عددية من مخرجات الشبكة ضمن نطاق البيانات المدروسة (5000 نقطة عبر محاكاة مونت كارلو) غطت كامل نطاقات المتغيرات المدروسة، لم تستخدم النقاط الاصطناعية باعتبارها بديلاً عن النتائج التجريبية، وإنما استخدمت كمرحلة عددية وسيطة لتكثيف تمثيل العلاقة التي تعلمتها الشبكة العصبية داخل المجال التجريبي، ثم تم تمرير هذه النقاط عبر النموذج العصبي للحصول على مقاومة القص المقابلة. بعد ذلك، استخدم الانحدار المتعدد غير الخطي لمعايرة الثوابت الأربعة A,B,C,D لتحقيق أفضل توافق (أقل مجموع لمربعات الأخطاء) بين قيم مقاومة القص المحسوبة من العلاقة المبسطة وتلك المولدة من الشبكة العصبية.

$$\min_{A,B,C,D} \sum_{i=1}^{N} \left(V_{n,i}^{ANN} - V_{n,i}^{model}(A,B,C,D)\right)^2 \qquad (20)$$

أظهرت عملية التحسين أن القيم المثلى هي:

$$\boldsymbol{A = 0.52, B = 10, C = 0.7, D = 1.23}$$

وبذلك يصبح الشكل النهائي للعلاقة المطورة:

$$\boldsymbol{V_n = \left[0.52\,.e\,.f_{ct} + 10\,.\rho\,.\frac{d}{a}\right].b_w\,.d + 0.7\,v_b} \qquad (21)$$

$$\boldsymbol{f_{ct} = \frac{f'c}{20 - \sqrt{F}} + 1.23 + \sqrt{F}} \qquad (22), \qquad \boldsymbol{F = V_f \frac{L_f}{D_f}\beta} \qquad (23)$$

$\boldsymbol{Vn}$: مقاومة القص $(\boldsymbol{kN})$ — $\boldsymbol{A,B,C,D}$: معاملات تجريبية محددة بواسطة $\boldsymbol{ANN}$

e: عامل العمل القوسي — ρ: نسبة التسليح الطولي

d/a: نسبة العمق الفعال إلى بحر القص — bw: عرض الويب $(\boldsymbol{mm})$

d: العمق الفعال(mm) — $f'c$: مقاومة الضغط للخرسانة$(\boldsymbol{MPa})$

fct: مقاومة الشد للخرسانة(MPa) — F: عامل الألياف

Vf: النسبة الحجمية للألياف$(\%)$ — Lf/Df: نسبة الطول إلى القطر للألياف

β: عامل التماسك (يعتمد على شكل الألياف) — vb: مساهمة الألياف في مقاومة القص$(\boldsymbol{kN})$

حيثβ: 0.5 للألياف المستقيمة، 0.75 للألياف المتعرجة، 1.0 للألياف ذات النهايات المعقوفة.

هذه المعادلة تمثل نسخة مطورة من نموذج درويش الأصلي، فقد تم تعديل المعاملات لتعكس تأثير العوامل المختلفة بدقة أعلى، حيث يجمع عامل الألياف F بين النسبة الحجمية للألياف، نسبة الطول إلى القطر، وعامل التماسك، مما يعطي تمثيلاً شاملاً لتأثير الألياف، ويمكن استخدام هذه العلاقة في تصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بالألياف الفولاذية، خاصة عندما تكون نسبة a/d ضمن النطاق المدروس، وتتميز العلاقة المطورة عن Ashour2 في أنها لا تقتصر على تعديل معامل واحد أو إضافة حد مباشر، وإنما تستخدم نموذج ANN أولاً لتمثيل العلاقة غير الخطية ثم تقوم باشتقاق صيغة تحليلية مبسطة منه.

8- تقييم أداء العلاقة المطورة عبر فئات مختلفة من نسبة a/d

لضمان فهم أعمق لأداء العلاقة المطورة، ولمعرفة ما إذا كانت دقتها تتأثر باختلاف نسبة فضاء القص إلى العمق الفعال (a/d) وهو المتغير الأكثر تأثيراً في النموذج كما أظهر الجدول (5) تم تقسيم قاعدة البيانات المكونة من 88 حالة إلى فئتين رئيسيتين بناءً على قيمة النسبة a/d، وذلك وفقاً للحدود الفاصلة التي تستخدمها معظم العلاقات التحليلية والكودات العالمية للتمييز بين آليات الانهيار المختلفة:

- الجوائز ذات نسبة a/d منخفضة :($a/d < 2.5$) وتتميز بسيطرة آليات القص المباشر والعمل القوسي، حيث تلعب الألياف دوراً بارزاً في تجسير الشقوق المائلة.
- الجوائز ذات نسبة a/d مرتفعة :($a/d \geq 2.5$) حيث تسود آليات الانحناء والقص المركب، وتكون مساهمة الألياف أكثر ارتباطاً بالتحكم في تشققات الشد وإعادة توزيع الإجهادات.

وقد حُسبت المعاملات الإحصائية لعامل الأداء لكل فئة على حدة، لكل من العلاقة الأصلية (Darwish)والعلاقة المطورة، كما هو موضح في الجدولين (6) و (7) وذلك لتقييم مدى تحسن الأداء عبر مختلف المجالات، ولمعرفة ما إذا كان التحسن الذي أظهرته العلاقة المطورة متسقاً عبر جميع نطاقات a/d أم أنه يتركز في نطاق معين.

الجدول (6): قيم المعاملات الإحصائية لفئتي a/d للعلاقة الأصليةDarwish

المعامل الإحصائي	عدد الحالات: ($a/d < 2.5$ 31)	عدد الحالات: ($a/d \geq 2.5$ 57)
المتوسط (Average)	1.285	1.181
الانحراف المعياري (St.Dev)	0.512	0.382
معامل الاختلاف (COV%)	39.84%	32.35%
معامل الارتباط (R)	0.81	0.87
معامل التحديد (R^2)	0.66	0.76

يوضح الجدول (6) أن علاقة Darwish الأصلية كانت أكثر دقة واتساقاً في الفئة ذات $a/d \geq 2.5$ ، بينما أظهرت أداءً أقل دقة واتساقاً في الفئة ذات$a/d < 2.5$ ، وهذا يشير إلى أن العلاقة الأصلية تميل إلى المبالغة في تقدير مقاومة القص في الجوائز القصيرة المجاز (حيث تسود آليات القص المباشر والعمل القوسي)، مما يعكس قصوراً في تمثيل مساهمة الألياف في هذه الفئة من الجوائز.

الجدول (7): قيم المعاملات الإحصائية لفئتي a/d للعلاقة المطورة(ANN)

المعامل الإحصائي	عدد الحالات: ($a/d < 2.5$ 31)	عدد الحالات: ($a/d \geq 2.5$ 57)
المتوسط (Average)	1.018	0.998
الانحراف المعياري (St.Dev)	0.321	0.277
معامل الاختلاف (COV%)	31.53%	27.76%
معامل الارتباط (R)	0.86	0.89
معامل التحديد (R^2)	0.74	0.79

يظهر الجدول (7) أن العلاقة المطورة حققت تحسناً ملحوظاً في كلتا الفئتين مقارنة بالعلاقة الأصلية، حيث تم حساب نسبة التحسن الطارئة في كل منهما في الجدول (8)

الجدول (8): نسبة التحسن في المعاملات الإحصائية بين العلاقة المطورة والعلاقة الأصلية لكل فئة

المعامل الإحصائي	التحسن في فئة $a/d < 2.5$	التحسن في فئة $a/d \geq 2.5$
المتوسط (Average)	20.8%	15.5%
الانحراف المعياري (St.Dev)	37.3%	27.5%
معامل الاختلاف (COV%)	20.9%	14.2%
معامل الارتباط (R)	6.2%	2.3%
معامل التحديد (R^2)	12.1%	3.9%

يكشف الجدول (8) أن التحسن الأكبر الذي أحدثته العلاقة المطورة كان في فئة الجوائز ذات نسبة a/dالمنخفضة ($a/d < 2.5$) حيث تحسن متوسط عامل الأداء بنسبة 20.8%، وتحسن معامل الاختلاف بنسبة 20.9%، وتحسن الانحراف المعياري بنسبة 37.3%. وهذا يؤكد أن المعاملات الجديدة (A=0.52, B=10, C=0.7, D=1.23) التي اشتُقت باستخدام ANN كانت أكثر قدرة على تمثيل التفاعل المعقد بين الألياف وآليات القص المباشر والعمل القوسي في الجوائز القصيرة المجاز، وهو المجال الذي كانت العلاقات التقليدية تعاني من قصور في تمثيله بدقة، أما في فئة الجوائز ذات نسبة a/d المرتفعة ($a/d \geq 2.5$)، فقد كان التحسن أقل وضوحاً ولكنه ما زال ملحوظاً، حيث تحسن متوسط عامل الأداء بنسبة 15.5%، وتحسن معامل الاختلاف بنسبة 14.2%. وهذا يعكس أن العلاقة الأصلية كانت بالفعل أكثر دقة في هذه الفئة (كما أظهر الجدول 6)، ولكن العلاقة المطورة تمكنت من تحسين الأداء أيضاً.

9- مجال صلاحية العلاقة وحدود التطبيق

العلاقة المطورة مشتقة من قاعدة بيانات محددة، ولذلك يجب استخدامها ضمن المجال التجريبي الذي بني عليه النموذج، ولا يُوصى باستخدام العلاقة في الحالات التي تتجاوز المجالات المدروسة، ومنها:

- مقاومة ضغط الخرسانة خارج نطاق (23.9–60.2) MPa.
- نسبة الألياف خارج نطاق (0.25–1.5)%.
- نسبة a/d خارج النطاق (1.13–4.50).
- الجوائز المزودة بتسليح عرضي (كانات).
- الجوائز T أو الأشكال غير المستطيلة.
- الجوائز المسلحة بألياف FRP أو أنواع أخرى من الألياف غير المدروسة.

كما يجب التنبيه إلى أن العلاقة الحالية لا تمثل نموذجاً للجوائز المزودة بالكانات، إذ لم يدخل تأثير الكانات ضمن متغيرات النموذج، وبالتالي لا ينبغي إضافة مساهمة الكانات إلى القيمة المحسوبة من العلاقة مباشرة، بل يجب استخدام نموذج منفصل يأخذ التسليح العرضي بالحسبان.

الاستنتاجات(Conclusions)

1. حققت الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) بنية (11–18–1) أداءً جيداً (معامل ارتباط R = 0.960 في الاختبار)، وأخطاء أقل من 5%.
2. كشف تحليل الحساسية الكمي أن العوامل الهندسية خاصة نسبة القص إلى العمق الفعال a/dبنسبة (23.4%)، تليها خصائص الألياف النسبة الحجمية Vf بنسبة (19.8%) ومقاومة الخرسانة (15.2%)، هي الأكثر تأثيراً في مقاومة القص، مما يُلزم المصمم بالتركيز على الضوابط الهندسية وخصائص المواد.
3. تم اشتقاق علاقة تحليلية مطورة من صيغة Darwish بثوابت جديدة A=0.52, B=10, C=0.7,D=1.23 مما أدى إلى تحسين في الدقة حيث انخفض معامل الاختلاف (COV) من 35.49% إلى 29.15%، وارتفع معامل التحديد (R^2) من 0.72 إلى 0.77.

4. أثبت تحليل التفاعلات وجود تأثير تآزري قوي بين الألياف ونسبة القص $(a/d \times Vf)$، خاصةً في الجوائز قصيرة المجاز $(a/d < 2.5)$ حيث تحسنت دقة العلاقة المطورة بأكثر من 20%.
5. تتحدد صلاحية العلاقة المطورة بدقة ضمن نطاق البيانات المدروسة (جوائز مستطيلة بدون كانات، مقاومة خرسانة $60.2–23.9MPa$، نسبة ألياف 0.25–1.5%، ونسبة a/d من 1.13 إلى 4.50)، ولا يصح تطبيقها خارج هذه الحدود دون تحقق تجريبي مستقل.

التوصيات(Recommendations)

1. يُوصى بتوسيع قاعدة البيانات لتشمل جوائزT، والعناصر المزودة بتسليح عرضي (كانات)، وأنواعاً أخرى من الألياف (بوليمرية، زجاجية)، وإجراء تحقق خارجي مستقل لتعزيز قدرة النموذج على التعميم.
2. يُوصى بتطوير واجهة برمجية (تطبيق حاسوبي) سهلة الاستخدام تعتمد على العلاقة المطورة، لتسريع تقدير مقاومة القص في المكاتب الهندسية ومراحل التصميم الأولية.
3. يُوصى بإعادة النظر في معادلات الكودات العالمية خاصة ACI 318–19 لتشمل تأثير الألياف بشكل أكثر دقة، خاصة في حالات نسب الألياف العالية أو نسب a/d المنخفضة.
4. يُوصى بإجراء دراسات إضافية تشمل الأحمال الديناميكية والمتكررة، ودراسة التفاعلات ذات الرتب الأعلى بين المتغيرات، مع الأخذ بالاعتبار أن العلاقة المطورة تمثل خطوة بحثية أولية ولا يُوصى باعتمادها مباشرةً في الكود قبل استيفاء شروط التحقق الميداني المستقل.

المراجع References:

1. Sharma, A.K. Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *ACI Journal Proceedings*, 1986, *83*.
2. Narayanan, R.; Darwish, I.Y.S. Use of steel fibers as shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, 1987, *84*, 216–227.

3. Ashour, S.A.; Hasanain, G.S.; Wafa, F.F. Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 1992, *89*.
4. Naik, U.; Kute, S. Span-to-depth ratio effect on shear strength of steel fiber-reinforced high-strength concrete deep beams using ANN model. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2013, *5*, 29.
5. Khuntia, M.; Stojadinovic, B.; Goel, S.C. Shear strength of normal and high-strength fiber reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Structural Journal*, 1999, *96*.
6. Singh, B.; Jain, K. An appraisal of steel fibers as minimum shear reinforcement in concrete beams (with Appendix). *ACI Structural Journal*, 2014, *111*.
7. Sahoo, D.R.; Sharma, A. Effect of steel fiber content on behavior of concrete beams with and without stirrups. *ACI Structural Journal*, 2014, *111*, 1157–1166.
8. Shoaib, A.; Lubell, A.S.; Bindiganavile, V.S. Shear response of lightweight steel fiber reinforced concrete members without stirrups. *Materials and Structures*, 2015, *48*, 3141–3157.
9. Anand, R.M.; Sathya, S.; Sylviya, B. Shear strength of high-strength steel fibre reinforced concrete rectangular beams. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017, *8*, 1716–1729.
10. Arslan, G.; Keskin, R.S.O.; Ulusoy, S. An experimental study on the shear strength of SFRC beams without stirrups. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, *55*, 1205–1217.
11. Parra-Montesinos, G.J.; Wight, J.K.; Dinh, H.H.; Libbrecht, A.; Padilla, C. *Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups*. University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 2006; p. 39.
12. Rosenbusch, J.; Teutsch, M. Trial beams in shear. *Brite/Euram Project 97-4163 Final Report Sub Task 4.2*. Technical University of Braunschweig: Braunschweig, Germany, 2003; pp. 105–117.
13. Sahoo, D.R.; Bhagat, S.; Reddy, T.C.V. Experimental study on shear-span to effective-depth ratio of steel fiber reinforced concrete T-beams. *Materials and Structures*, 2016, *49*, 3815–3830.
14. Amin, A.; Foster, S.J. Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups. *Engineering Structures*, 2016, *111*, 323–332.

15. Tahenni, T.; Chemrouk, M.; Lecompte, T. Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams. *Construction and Building Materials*, 2016, *105*, 14–28.

الاستجابة الزلزالية للأساسات السطحية: تقييم التسييل الموضعي والهبوط 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:

تمت دراسة سلوك الأساسات السطحية تحت تأثير التحميل الزلزالي بشكل واسع، وعلى الرغم من وفرة الدراسات التي تناولت السلوك الزلزالي للأساسات السطحية، وقد ركزت معظم الدراسات السابقة على الأساسات السطحية دون النظر إلى التفاعل المعقد بين عمق التأسيس واضطراب التربة المحيطة، وهو ما قد يؤدي إلى تسييل موضعي وهبوط أكبر مما هو متوقع .إلا أن استجابة هذه الأساسات وتأثير عمق التأسيس على الاستجابة الديناميكية لا تزال غير مفهومة بشكل كافٍ، خاصة فيما يتعلق باضطراب التربة الناتج عن الحفر ووضع الأساس. تهدف هذه الدراسة إلى استقصاء تأثير عمق التأسيس على بدء التسييل والهبوط الناتج، باستخدام أساس مربع (0.1m×0.1m) موضوع على ثلاثة أعماق مختلفة: على سطح العينة، وعلى عمق 0.03m، وعلى عمق 0.05m تحت سطح التربة وتحت تأثير نفس الضغط المطبق من الأساس (1Kpa). تم تجهيز العينة الرملية المشبعة في صندوق التربة الصلب، كما تم تطبيق حركة جيبية (0.2g,2Hz) وباستخدام الحساسات اللازمة تم تسجيل ضغط ماء المسام الزائد، التسارع، والهبوط. أظهرت النتائج وجود عمق وسطي (حوالي 10% من سمك الطبقة القابلة للتسييل) كـ "عمق حرج" يزيد بشكل كبير من مخاطر التسييل الموضعي والهبوط الكبير، وبالتالي ضرورة مراعاة اضطراب التربة الناتج عن الحفر وإعادة توزيع الإجهادات عند تقييم قابلية التسييل للأساسات السطحية على أعماق مختلفة.

الكلمات المفتاحية: عمق التأسيس، التسييل الموضعي، هبوط الأساسات، الطاولة الاهتزازية، اضطراب التربة، التفاعل بين التربة والمنشأ.

Seismic Response of Shallow Foundations: Evaluating Localized Liquefaction and Settlement via Shaking Table Modeling

, 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

The behavior of shallow foundations under seismic loading has been extensively studied. Despite the abundance of studies addressing the seismic behavior of shallow foundations, most previous studies have focused on shallow foundations without considering the complex interaction between foundation depth and surrounding soil disturbance, which may lead to localized liquefaction and settlement greater than expected. However, the response of these foundations and the effect of foundation depth on the dynamic response are still not sufficiently understood, especially with regard to soil disturbance caused by excavation and foundation placement. This study aims to investigate the effect of embedment depth on liquefaction initiation and resultant settlement. A square footing (0.1m × 0.1m) was tested at three different depths: at the soil surface, at a depth of 0.03m, and at a depth of 0.05m, maintaining a constant applied pressure of 1 kPa. Saturated sandy specimens were prepared in a rigid soil box and subjected to sinusoidal motion (0.2g, 2Hz). Excess pore water pressure, acceleration, and settlement were recorded using specialized sensors. The results identified an intermediate depth (approximately 10% of the liquefiable layer thickness) as a "critical depth" that significantly increases the risk of localized liquefaction and substantial settlement. Therefore, it is necessary to consider soil disturbance resulting from excavation and stress redistribution when assessing the liquefaction of shallow foundations at different depths.

Keywords: Embedment depth, Localized liquefaction, Foundation settlement, Shaking table, Soil disturbance, Soil-Structure Interaction (SSI)

1-المقدمة:

تعتبر ظاهرة التسييل liquefaction الناتجة عن حدوث الزلازل واحدة من أخطر المشاكل الهندسية حيث يشكل تسييل التربة خطراً كبيراً على البنية التحتية السطحية وتحت الأرضية وعلى حياة الإنسان. إن فقدان قدرة تحمل التربة ومقاومة القص، والانتشار الجانبي للتربة، وحركة كتلة التربة الكبيرة وما يصاحبها من هبوطات وحدوث تشققات أرضية جميعها عوامل يمكن أن تعرض البنية التحتية لمختلف أنواع الإجهادات والتشوهات (Teixeira, 2024). قام العديد من الباحثين بدراسة ظاهرة تسييل التربة منذ ظهور تأثيراتها للمرة الأولى في زلزال Alaska 1964 وزلزال Niigata اليابان عام 1964 والذي تسبب بحدوث أضرار بالغة بالمنشآت الهندسية (Seed and Lee, 1966; Seed & Idriss, 1971; Yoshimi et al, 1984; Ishihara, 1996;).

فعندما تتعرض الترب الرملية المشبعة المخلخلة إلى أحمال زلزالية سريعة، فإن ماء المسام الغير قابل للانضغاط وبسبب عدم كفاية الوقت اللازم للتصريف يؤدي لحدوث انخفاض في حجم التربة وبالتالي يساهم ميل التربة للانكماش والانضغاط إلى تراكم ضغط زائد في ماء المسام، وحدوث التسييل في نهاية المطاف وبذلك تكون التربة الحبيبية المفككة أكثر عرضة للتسييل لأنها قابلة للانضغاط والانكماش بدرجة كبيرة تحت تأثير القص الدوري، وذلك بسبب نسبة الفراغات المرتفعة بين جزيئات التربة (Hīkina Whakatutuki.2016) . كما وجد بأن حدوث ظاهرة التسييل لا يتوقف فقط على الترب الحبيبية أو وصول قيمة ضغط ماء المسام إلى قيمة الإجهاد الفعال الليثوستاتيكي (الإجهاد الفعال الابتدائي الناتج عن الوزن الذاتي للتربة في الظروف الساكنة قبل تطبيق الحمل الزلزالي وهو يستخدم كقيمة مرجعية لحساب ضغط ماء المسام في دراسات التسييل)، وإنما يرتبط أيضاً بتسارع الحبيبات الأفقي، وطفو السوائل، وارتفاع ضغط ماء المسام فقد يحدث انخفاض حجم التربة حتى عند قيم منخفضة نسبيًا لذروة التسارع الأرضي (PGA)، وذلك فقط بسبب تأثير الطفو. ومع ذلك، وجد بأن الانخفاض يتعزز بشكل كبير بفعل ضغط المسام الناتج ديناميكيًا ويحدث هذا حتى عندما تبقى قيمة ضغط المسام أقل من قيمة الإجهاد الفعال، أي حتى عندما لا يتحقق معيار التسييل الكلاسيكي على نطاق المختبر، والذي ينص على أن ضغط المسام يساوي الإجهاد الفعال الليثوستاتيكي وبالتالي

يمكن أن يحدث التسييل نتيجة لقوة رفع عالية بما يكفي، تتغلب على مقاومة التربة (Ben- Zeev, et al, 2017). وفي دراسة أجريت من قبل (Singh et al, 2019) وجدوا بأن مقاومة التسييل تزداد مع انخفاض درجة الإشباع الأولية، ومع زيادة الكثافة النسبية وضغط الحصر الفعال الأولي وعندما تقترب درجة الإشباع من 100%، يكون تأثيرها على مقاومة التسييل أكثر أهمية. بالإضافة لما سبق فإن مقاومة الترب الرملية للتسييل الدوري تتأثر بعدة عوامل أخرى مثل عدد الدورات، ونسبة المواد الناعمة، وتاريخ الإجهادات، وعمر الترسبات، وغيرها حيث تُظهر نتائج الدراسات المخبرية التي أجراها (Lentini et al, 2019) بأن مقاومة الرمال المختبرة للتسييل الدوري تزداد مع انخفاض إجهادات الحصر الأولية، وتقل مع ازدياد نسبة السيلت كما أكدت النتائج أن المواد الأكثر خشونة أقل عرضة للتسييل. هذا وتعتبر سعة التسارع أهم مُعامل يتحكم في التسييل أثناء التحميل الدوري، فكلما زاد التسارع، قلّ عدد الدورات اللازمة للتسييل، وزاد ضغط ماء المسام المتولد، كما يتحقق تسييل محدود للرمال الأكثر كثافة عند أحمال دورية أقل، حيث يرتفع ضغط المسام إلى حد معين، لكن نسبة ضغط المسام لا تصل أبدًا إلى الواحد، ولا ينخفض الإجهاد الفعال إلى الصفر (Varghese & Gali, 2014). ونظراً لخطورة ظاهرة التسييل على المنشآت الهندسية وما يرافقها من حدوث هبوطات وميلان ودوران في أساسات المباني فقد حظي موضوع التفاعل الديناميكي بين الأساسات والترب القابلة للتسييل على اهتمام الباحثين في السنوات العشر الماضية سواء باستخدام النمذجة العددية أو من خلال التجارب المخبرية لتفسير تلك الآليات والعوامل المختلفة المسببة لحدوثها وتقييم استجابة الأساسات للتسييل أثناء الزلازل (Setyadi et al, 2024; Cerado & Estores, 2025; Amin & Singh, 2024). بينت دراسة (Zhang et al., 2015) أن الأساسات المدفونة على أعماق ضحلة تعدل من توزيع ضغوط المسام والإجهادات الفعالة في التربة المحيطة، وتسبب تركيزاً محلياً للإجهادات تحت زوايا الأساس، مع ميل إلى تقليل عمق التسييل حول المنشأ من جهة أخرى. بينما أشارت دراسة (Olarte et al. 2018) إلى أن التحكم في مسارات التصريف يمكن أن يكون له تأثيرات متضاربة، حيث أن إعاقة التدفق الخارجي للماء قد تزيد من ضغوط المسام الزائدة تحت أطراف الأساس، بينما يؤدي تعزيز التصريف إلى تقليل الهبوط والدوران. كما أظهرت دراسة قام بها الباحثان (Gourvenec & Randolph 2009) أهمية اختيار عمق تأسيس الأساسات السطحية لأنه يؤدي إلى إطالة مسارات التصريف، مما يقلل من معدل تبدد ضغط ماء المسام الزائد، كما يؤثر نوع التأسيس وخشونة السطح الفاصل بشكل ملحوظ على الاستجابة الديناميكية.

هناك أبحاث عديدة باستخدام الطاولة الاهتزازية للوصول إلى فهم أكثر لطبيعة التفاعل الديناميكي SSI (Soil Structure Interaction)، حيث تُستخدم الطاولة الاهتزازية في تجارب النمذجة الفيزيائية في الهندسة الجيوتكنيكية الزلزالية، وهي مهمة من أجل التطبيقات العملية لفهم سلوكيات التربة، وهي اختبارات واقعية وواضحة عند مناقشة استجابة المشاكل الجيوتكنيكية أثناء الزلزال مثل التسييل، واستجابة الأساسات، هبوطات ما بعد الزلزال والتفاعل الديناميكي بين التربة والمنشآت، ومشاكل ضغط التربة الجانبي (Alaie & Chenari, 2018).

قدم الباحثان (Ziotopoulou & Gazetas, 2022) دراسة علمية أثبتت أن زيادة عمق التأسيس تحسن من استقرار الأساس ضد الانهيارات الجانبية، لكنها قد تزيد من تراكم ضغط الماء المسامي حول جوانب الأساس المدفون. كما وجد (Barrios et al. 2020) أن عملية التصريف أثناء الزلزال له تأثير كبير على استجابة الأساسات، خاصة عند مستويات ضغوط الحصر المنخفضة، وأن تسارع الأساسات يتأثر بعددها وموقعها. أما الباحثان (Nguyen & Ghalandarzadeh, 2023) فقدما نموذجاً رياضياً يربط بين عمق التأسيس ومعدل تولد ضغط الماء المسامي، وأثبتا بأن الأساسات الأكثر عمقاً تستفيد من إجهاد الحصر (Confinement) العالي الذي يؤخر لحظة التسييل. توجد دراسة علمية قام بها (Qiu & Elgamal, 2020) حول المحاكاة العددية للتفاعل الديناميكي بين التربة والأوتاد المقامة في الترب القابلة للتسييل تبين بأن التربة المحيطة بالجوانب تلعب دوراً هاماً في نقل الأحمال الديناميكية الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض مقاومتها للضغط الجانبي بمحيط الأساس عندما تسييل الترب السطحية. تم نشر ورقة بحثية في مجلة جامعة حمص اهتمت بدراسة الاستجابة الزلزالية للأبنية البيتونية العالية مع أخذ أثر التربة بعين الاعتبار من خلال استخدام برنامج النمذجة العددي (simulia'sAbaqus 6.14)،حيث تم أخذ أثر التربة اعتمادًا على الطريقة المباشرة (وسط التربة FEM حيث تم دراسة تأثير تغيير نوع التربة (تربة طرية و قاسية) على الاستجابة الزلزالية لبناء عالي مكون من 16طابقًا ،و اعتماد الجملة الثنائية لمقاومة الحمل الزلزالي، و استخدام العناصر Semi-infinite من مكتبة العناصر الصلبة لنمذجة وسط التربة وإدخال السجل الزلزالي El-Centro. وأظهرت نتائج التحليل وجود اختلافات بين أنواع التربة الطرية والقاسية خاصة فيما يتعلق بقيم الانتقالات والقص القاعدي والدور (المراد والحلواني،2021). ومن خلال ورقة بحثية أخرى وباستخدام برنامج النمذجة العددي ETABS تم اقتراح مجموعة من العلاقات تربط بين خصائص

المنشأ وبين معايير الاستجابة الزلزالية، بحيث تأخذ بعين الاعتبار تأثير مقدار وموقع عدم انتظام الصلابة على قيمة الدور الأساسي وقوة القص القاعدية التصميمية (فرج وآخرون، 2001). أيضاً بدراسة علمية أخرى تهتم بالسلوك الزلزالي للإطارات البيتونية والغير مصممة على القوى الزلزالية (الابراهيم و العامودي، 2021) حيث أظهرت النتائج فعالية التقوية في زيادة المقاومة الجانبية ، تخفيض الانتقالات الأفقية، وتخفيض دور الاهتزاز لنماذج الإطارات المدروسة حيث تزداد هذه الفعالية مع زيادة كل من السماكة ونسبة مقاومة البيتون ، بينما تتناقص الفعالية مع زيادة عدد الطوابق.

وبالتالي نلاحظ بأن الدراسات التجريبية ولاسيما التجارب الديناميكية لم تحظى بالاهتمام الكبير ولاسيما بإدخال أثر التفاعل الديناميكي بين المنشأ والتربة المعرضة للتسييل ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث المنشور لتغطية ظاهرة تسييل التربة الرملية المشبعة باستخدام الطاولة الاهتزازية.

2-هدف البحث:

يهتم هذا البحث بدراسة تأثير عمق الأساس وتوزيع الإجهادات وبصلة الإجهاد لحظة حدوث التسييل في التربة الرملية المشبعة على مسألة التفاعل الديناميكي ومناقشة النتائج.

3-مواد وطرق البحث:

تم إجراء سلسلة من الاختبارات باستخدام طاولة اهتزازية (0-1 g) تتحرك باتجاه أفقي وحيد، الشكل (1)، حيث تم تحضير العينة الرملية المشبعة ضمن صندوق التربة الصلب rigid soil box المصنوع من مادة plexi- glass المرنة وبأبعاد تتناسب مع أبعاد الطاولة الاهتزازية الأبعاد الداخلية: (0.38m) طول، (0.38m) عرض، (0.49 m) ارتفاع. وهي نفسها أبعاد العينة الرملية المشبعة من حيث الطول والعرض ولكن ارتفاع العينة (0.285m). تم تثبيت 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 تحضير العينة بطريقة الترسيب الرطب يدوياً، وبعد 24 ساعة من التحضير تم عمل الحفرة في منتصف العينة على عمق التأسيس المطلوب للتجربة، ومن ثم وضع الأساس، كما تم

تثبيت حساس التسارع على الأساس وكذلك الأمر بالنسبة لحساس الانتقال بهدف رصد تسارع وهبوطات الأساس المربع الناتجة عند تطبيق الحركة الزلزالية، الشكل (2). تم اختيار أبعاد الأساس المستخدم في التجربة (B=0.1*0.1m) وكذلك الضغط المطبق من الأساس يساوي 1Kpa. حيث تعتبر هذه الأبعاد والضغط المطبق من الأساس نموذجية لكي نتجنب تداخل تأثير جدران صندوق التربة الصلب مع الأمواج القصية الناتجة عن الحركة وبالتالي تعبر النتائج عن سلوك التربة الرملية المشبعة الحر بشكل أدق، كما أن هذا الضغط يمثل سلوك المنشآت الخفيفة. وبالعودة لقوانين التشابه (Iai, 1989)تم اختيار 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 (1Kpa). تمت دراسة تغيرات ضغط ماء المسام في حالة السطح الحر (بدون وجود أساس) وفي حالة وجود الأساس، حيث وضع الأساس مرة على سطح التربة، ومرة على عمق (0.03m)، ومرة على عمق (0.05m).
خضع صندوق التربة الصلب مع العينة الرملية المشبعة إلى حركة جيبية بتسارع 0.2g وتردد 2Hzباستخدام الطاولة الاهتزازية في جميع الاختبارات. في هذه الدراسة تم استخدام رمل نهري ذو تدرج حبيبي ضعيف، حيث يقع توزيع حجم الحبيبات ضمن نطاق التسييل (Xenaki et al, 2003)، يوضح الشكل (3) منحني التركيب الحبي للرمل المستخدم، بينما يعرض الجدول (1) الخصائص الفيزيائية له.



e d c b a

الشكل (1) يبين الطاولة الاهتزازية مع ملحقاتها حيث: a دارة التحكم الالكترونية بالطاولة الاهتزازية، b شاشة التحكم بالمدخلات الديناميكية للطاولة، c الطاولة الاهتزازية وعليها صندوق التربة الصلب، d مجموعة محصل البيانات موصولا بها حساس ضغط ماء المسام وحساس التسارع ومقياس الانتقال الشاقولي و وحساس الانتقال الأفقي الخاص بالطاولة، e شاشة برنلمج معالجة الإشارات القادمة من محصل البيانات.

تم تطبيق حركة اهتزازية جيبية بتردد 2Hz وتسارع 0.2 g لجميع الاختبارات، كما تم تقدير قيمة بصلة الإجهاد ،العمق المؤثر $Z_{10\%}$، (عمق بصلة الإجهاد حتى 10% من الضغط المطبق وهو 1 كيلو باسكال) وحسب نظرية Boussinesq (وهي الأكثر استخداما في حالة الترب الرملية) تم الاعتماد على القانون الأساسي لزيادة الإجهاد الشاقولي تحت منتصف أساس مربع الشكل وبتطبيق المعادلة $\Delta\sigma_z = I_\sigma \times q$ بحيث تصل زيادة الإجهاد إلى $I_\sigma = 10\% = 0.1$ وباستخدام جداول معاملات التأثير (Fadum, 1948) بالنسبة للأساس المربع، تبين أن العمق المؤثر يقع عند عمق يقارب ضعف عرض الأساس ($Z_{10\%} \approx 2B$)، وهذه النتيجة متوافقة مع الحلول المرنة المقدمة من(Poulos & Davis, 1974).



e d c b a

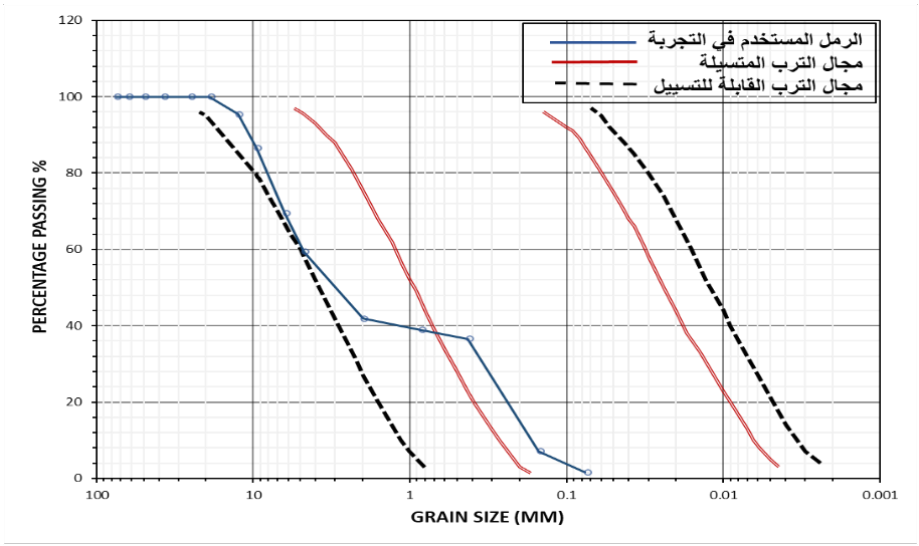
الشكل (2) يبين مراحل تحضير وحفر موضع الأساس في العينة الرملية المشبعة. a يبين موقع حساس ضغط ماء المسام في قاعدة العينة، b تحديد موقع الحفرة بعد مرور 24 ساعة من تحضير العينة، c بعد عملية الحفر على العمق المطلوب، d وضع الأساس في الحفرة مثبت عليه حساس التسارع ومقياس الانتقال، e نظام تربة – أساس أثناء الحركة الزلزالية،

الجدول (1) مواصفات الرمل المستخدم في تجارب الطاولة الاهتزازية

الوزن النوعي	$G = 2.66$
الكثافة النسبية	$D_r = 47\ \%$
وزن واحدة حجم الماء	$\gamma_w = 10\ Kn/m^3$
وزن واحدة حجم الإشباع	$\gamma_{sat} = 21.2\ Kn/m^3$
نسبة الفراغات الأعظمية	$e_{max} = 0.593$
نسبة الفراغات الأصغرية	$e_{min} = 0.357$
وزن واحدة الحجم الأعظمي	$\gamma_{d_{max}} = 19.6\ Kn/m^3$

وزن واحدة الحجم الأصغري	$\gamma_{d_{min}} = 16.7\ Kn/m^3$
عامل الانتظام	$C_U = 29.1$
عامل الانحناء	$C_C = 0.1$

حيث الهدف من هذا الإجراء هو إيجاد هذا العمق (يحسب من قاعدة الأساس المدفون في التربة) للحالات الثلاثة المدروسة والمرتبطة بتموضع وعمق الأساس وتأثيره على لحظة بدء التسييل من حيث تسارع وهبوط الأساس وضغط ماء المسام. تم تحليل وتفسير النتائج حسب (Kramer, 1996) المرجع الرئيسي في علوم الزلازل والحركات الأرضية والظواهر الجيوتكنيكية الزلزالية الخطيرة.

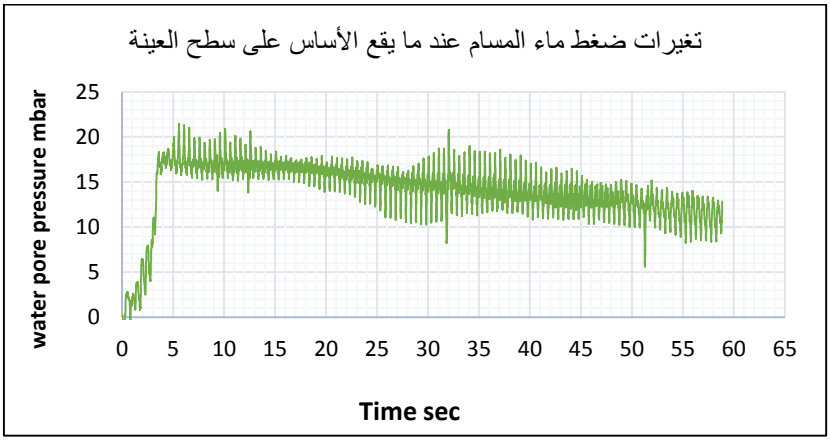


الشكل(3) التدرج الحبي للرمل المستخدم في الاختبارات

4-النتائج ومناقشتها:

بعد تطبيق الحركة الزلزالية المتولدة بواسطة الطاولة الاهتزازية تم التوصل إلى النتائج التالية حيث العمق المؤثر من قاعدة الأساس $Z_{10\%}=2B'=0.2$ m وذلك من أجل حساب الإجهادات الإضافية الناتجة عن تواجد الأساس على الأعماق الثلاثة. وبالتالي فإن قيمة الإجهادات الفعالة الكلية الأولية

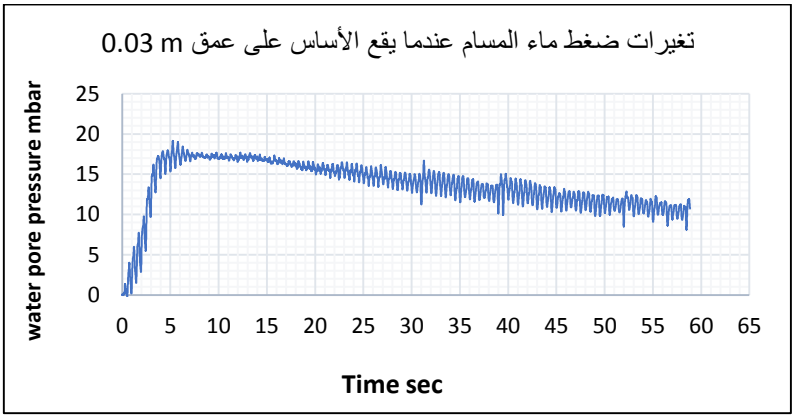
لنظام (تربة + أساس) حيث يوجد حساس ضغط ماء المسام على عمق Z= 0.275 m تساوي مجموع الإجهاد الفعال الأولي للتربة مضافاً إليها الإجهاد الإضافي الناتج عن وضع الأساس. عند حساس ضغط ماء المسام حيث الإجهاد الفعال الأولي الناتج عن الوزن الحجمي المغمور للتربة فقط يساوي σ'_{soil} = 3.08 Kpa ، وحسب عمق تموضع الأساس المربع الشكل في العينة الرملية المشبعة فإن قيم الإجهاد الإضافي الناتج عن وجود الأساس $\Delta\sigma_v$ والإجهادات الفعالة الكلية الأولية σ_v' نقرأها من الجدول (2). حيث نلاحظ بأن الزيادة في قيمة الإجهادات الإضافية الناتجة عن وضع الأساس على أعماق مختلفة والتي وصلت لحساس الضغط هي زيادة طفيفة نتيجة صغر حمل الأساس وانتشار الإجهادات في كل الاتجاهات مع زيادة عمق التأسيس، كما نلاحظ بأن العمق المؤثر عند العمق 5 سم يشمل معظم ارتفاع العينة الرملية المشبعة وبالتالي كبر حجم التربة المتأثرة ببصلة الإجهاد المنتشرة.



الشكل (4) يوضح تطور ضغط ماء المسام مع الزمن والأساس على سطح العينة

الجدول (2) نسبة الزيادة في قيمة الإجهاد الفعال حسب عمق الأساس Z

D_f (m) عمق التأسيس	Z(m) ارتفاع الأساس عن حساس الضغط	$\Delta\sigma_v$ (kPa) (الإجهاد الإضافي نتيجة وجود الأساس) عند موقع حساس ضغط ماء المسام	$\sigma_v' = \sigma'_{soil} + \Delta\sigma_v$ (kPa) قيمة الإجهادات الفعالة الكلية لنظام (تربة + أساس)	نسبة الزيادة في قيمة الإجهاد الفعال
0	0.275	0.071	3.08+0.071=3.151	0.023%
0.03	0.245	0.084	3.08+0.084=3.164	0.027%
0.05	0.225	0.095	3.08+0.095=3.175	0.031%

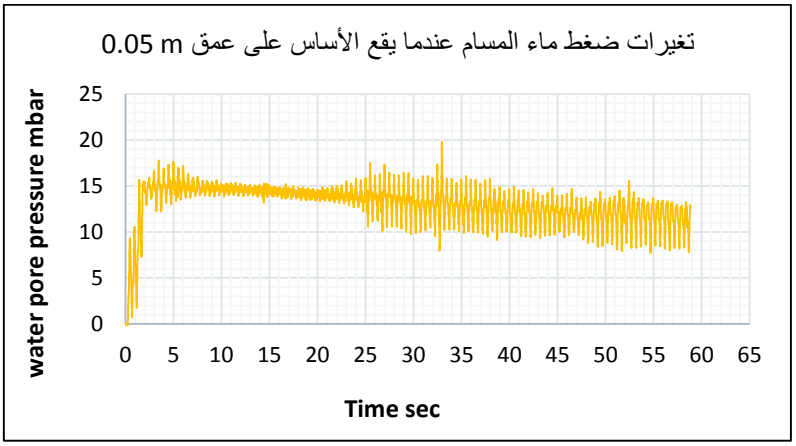


الشكل (5) يوضح تطور ضغط ماء المسام مع الزمن والأساس يقع على عمق (0.03m)

ومن الأشكال (4،5،6،7،8،9،10،11،12،) تم أخذ قيم تغيرات ضغط ماء المسام (mbar) عند لحظة بدء التسييل وتحول المنحني ضغط ماء المسام، كما أنه وعند نفس الزمن تم أخذ قيمة هبوط الأساس (mm) وتسارع الأساس (g) عند الأعماق الثلاثة، والشكل (13) يوضح تغيرات ضغط ماء المسام في حالة السطح الحر، كما يوضح الشكل (14) مقارنة بين هبوطات الأساس تحت تأثير التغيرات في عمق التأسيس. جميع النتائج التجريبية نجدها في الجدول (3).

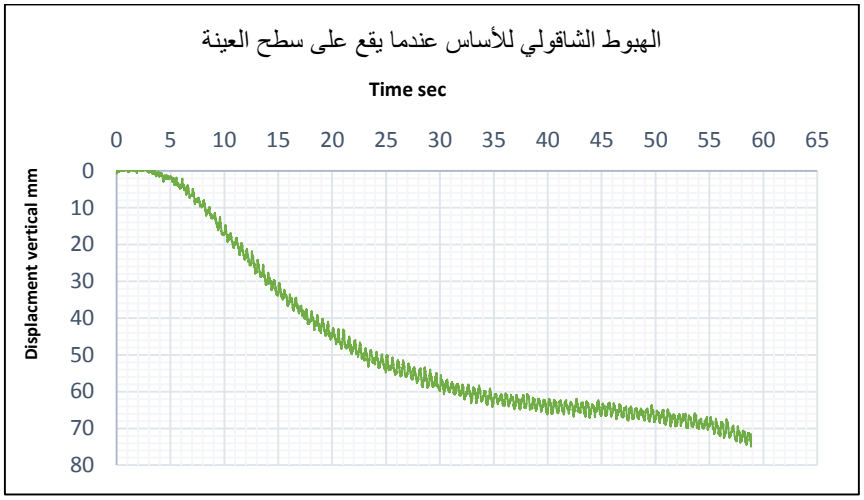
الجدول (3) يبين النتائج التجريبية الشاملة نتيجة اختبارات تأثير عمق الأساس على لحظة بدء التسييل

العمق	t_{liq} sec زمن بدء التسييل	P_{liq} mbar قيمة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل بالميلي بار	ΔU_{liq} Kpa قيمة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل بالكيلو باسكال	$r_u = \frac{u_{excess}}{\sigma'_{initial}}$ نسبة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل	$N_{liq}=t\times 2$ عدد دورات التحميل حتى لحظة بدء التسييل	الهبوط (مم)	التسارع (g)
السطح الحر	2.205	31.2	3.12	1.013	4.41	----	----
0 سم	4.03	18.217	1.822	0.578	8.06	0.592	0.217
3 سم	4.28	17.432	1.743	0.551	8.56	5.442	0.038
5 سم	2.37	15.39	1.539	0.485	4.74	1.949	0.049

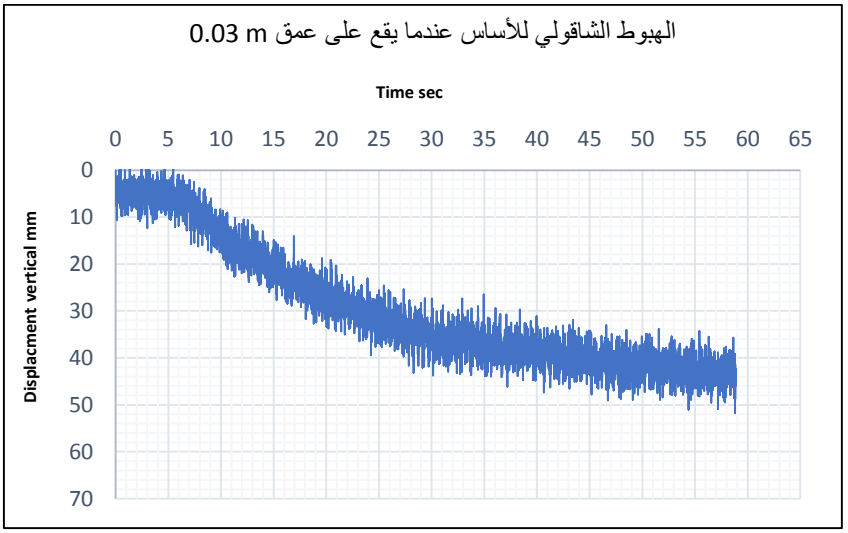


الشكل (6) يوضح تطور ضغط ماء المسام مع الزمن والأساس يقع على عمق (0.05m)

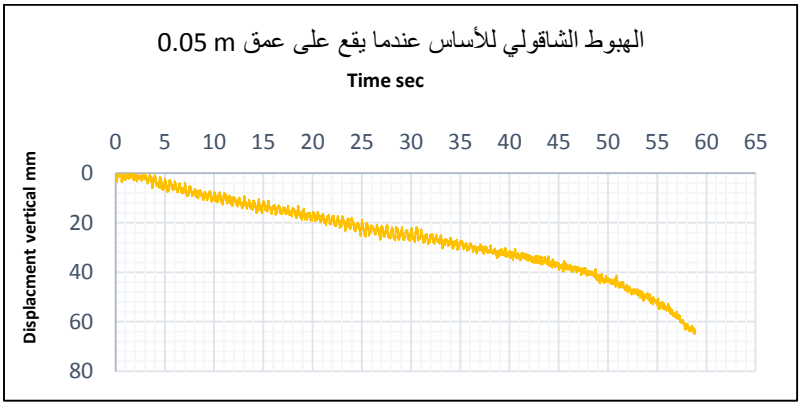
حيث تمثل سعة تذبذب ضغط ماء المسام الاستجابة الهيكلية لحبيبات التربة الرملية المشبعة، الصعود يمثل حالة الانكماش حيث تحاول الحبيبات الانضغاط، والهبوط يمثل حالة التمدد حيث تحاول الحبيبات الانزلاق والركوب فوق بعضها البعض وتعكس التغيرات اللحظية في ضغط ماء المسام خلال كل دورة. أما سعة تذبذب الهبوط فتمثل حالة الاضطراب الشاقولي اللحظي (الإزاحة الشاقولية للمنشأ) وهي لاتمثل اهتزازاً فقط وإنما غوص الأساس داخل التربة الرملية المشبعة التي تفقد قدرة تحملها تدريجياً والسعة الكبيرة تدل على أن الأساس لم يعد مستقراً على قاعدة صلبة بل يطفو فوق سائل كثيف. بمجرد حدوث التسييل، تبدأ التربة في الانكماش (إعادة ترتيب الحبيبات تحت تأثير الجاذبية) ويبدأ الهبوط في التزايد، ونلاحظ بأن منحني الإزاحة يتحول من شبه ثابت إلى منحني متزايد بشكل واضح مع قفزة في سعة التذبذب وميل عام للأسفل.



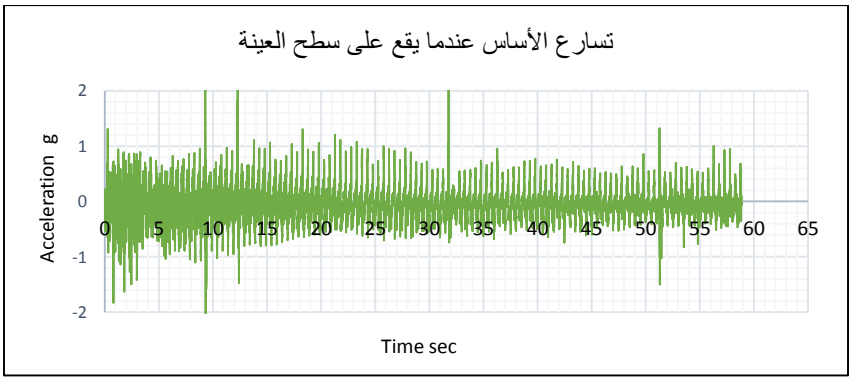
الشكل (7) يوضح الهبوط الشاقولي للأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على سطح العينة



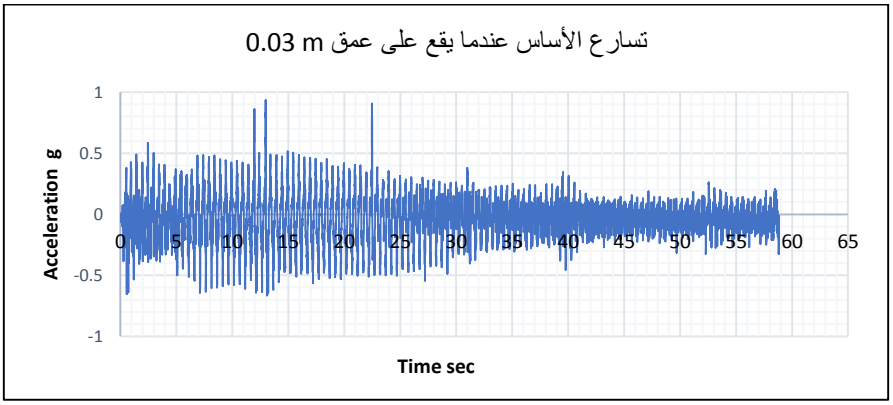
الشكل (8) يوضح الهبوط الشاقولي للأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على عمق (0.03m)



الشكل (9) يوضح الهبوط الشاقولي للأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على عمق (0.05m)

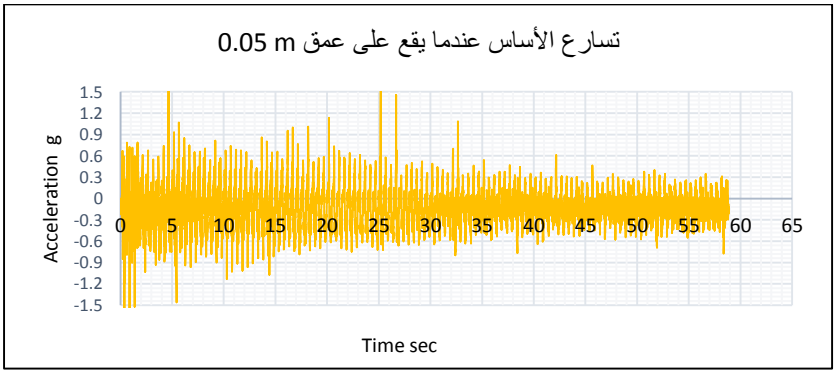


الشكل (10) يوضح تسارع الأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على سطح العينة.

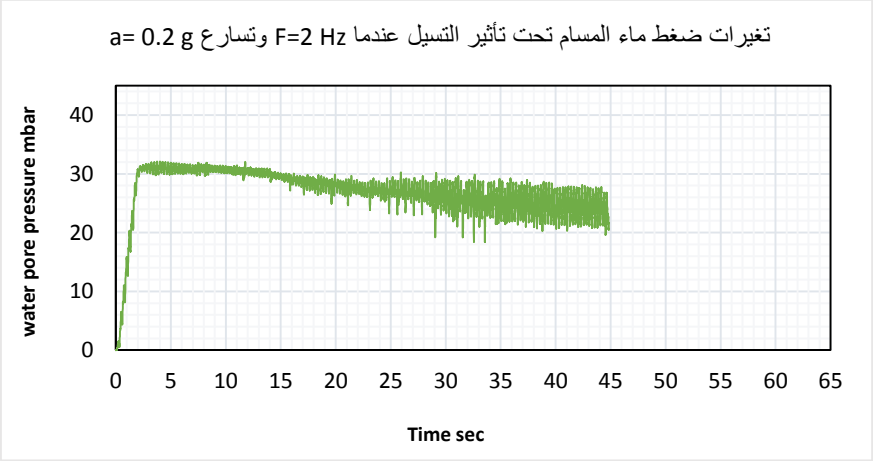


الشكل (11) يوضح تسارع الأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على عمق (0.03 m).

وأخيراً تمثل سعة تذبذب التسارع على الأساس كفاءة نقل الطاقة (Transmission efficiency) من التربة الرملية المشبعة إلى الأساس (التسارع الأفقي لكتلة المنشأ وهو بنفس اتجاه حركة الطاولة الاهتزازية) حيث قبل بدء التسييل تكون السعة عالية ومطابقة أو أكبر من تسارع الطاولة الاهتزازية المطبق، مما يعني أن التربة في طور الحالة الصلبة وتنقل الموجات القصية وإجهادات القص والصدمات إلى المنشأ بكفاءة.

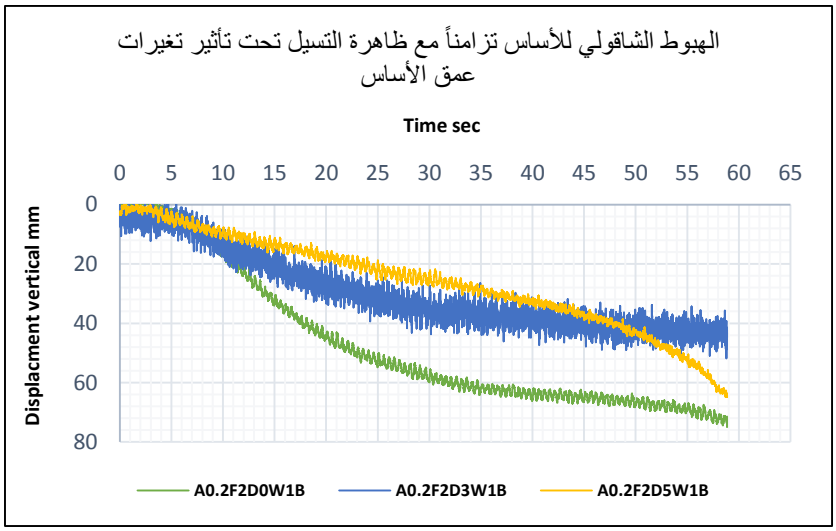


الشكل (12) يوضح تسارع الأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على عمق (0.05 m).



الشكل (13) نتائج الاختبار في حالة السطح الحر (بدون وجود أساس)

أما لحظة بدء ووصول التربة إلى حالة التسييل، تفقد قدرتها على نقل إجهادات القص. عندئذ تتقطع الآلية التي تنقل بها الحركة من القاعدة إلى السطح، وبأن التربة الملامسة للأساسات قد دخلت في طور الحالة السائلة، وأصبحت تعمل كوسادة مائية تمنع وصول الترددات العالية إلى المنشأ (الموجات القصية والتي لا تنتقل عبر السوائل) وتسمح فقط بمرور الموجات ذات الترددات المنخفضة (موجات الضغط)، وهذا ما يفسر تحول حركة الأرض الطبيعية السطحية إلى اهتزازات بطيئة وواسعة النطاق بعد التسييل، وبالتالي تنخفض سعة التسارع ونلاحظ انخفاضاً مفاجئاً في سعة التسارع المقاسة على الأساس (المنشأ)، هذا الانخفاض هو مؤشر هام في الدراسات التجريبية لبدء التسييل عند الأساسات.



الشكل (14) مقارنة الهبوطات الناتجة تحت تأثير تغيرات عمق التأسيس. حيث يعبر المنحني باللون الأخضر عن تواجد الأساس على سطح العينة والعمق 0، يعبر المنحني باللون الأزرق عن تواجد الأساس على العمق 0.03 م، يعبر المنحني باللون البرتقالي عن تواجد الأساس على العمق 0.05 م.

الجدول(4) مقارنة بين الأعماق الثلاثة.

العمق	N_{liq}	الهبوط (مم)	التسارع (g)	هل حدث تسييل؟	ملاحظات الدمج بين عمق بصلة الإجهاد وتأثيرها على التسييل من حيث عدد الدورات
السطح الحر	4.41	---	---	نعم كامل	----
0	8.06	0.592	0.217	جزئي (تضخيم)	تسييل غير كامل، تضخيم في التسارع وتأخير معتدل في عدد الدورات

تسييل موضعي شديد حول الأساس، هبوط كبير، انهيار في التسارع وتأخير أكبر في عدد الدورات	نعم (موضعي)	0.038	5.442	8.56	0.03 m
تسييل مبكر لكن الهبوط أقل بسبب تأثير القاعدة الصلبة	نعم (محتمل)	0.049	1.949	4.74	0.05 m

تفسير النتائج في **ضوء نظرية التفاعل الديناميكي** حيث من الجدول (4)؛ العمود الأخير والذي يمثل ملاحظات الدمج بين عمق بصلة الإجهاد وتأثيرها على التسييل من حيث عدد الدورات؛ نلاحظ بوضوح تأثير العمق على بصلة الإجهاد ولحظة بدء التسييل، أما العلاقة بين الهبوط والتسارع فنلاحظ مايلي:

– عند العمق 0 :هبوط صغير (0.59 مم) مع تسارع مرتفع (0.217g) لم يحدث تسييل كامل، بل تضخيم بسبب الرنين.

– عند العمق 0.03 m حدث هبوط كبير (5.44 مم) مع تسارع منخفض جداً (0.038g) هذا يدل على أن التسييل حدث بشكل كامل حول الأساس، مما أدى إلى فقدان كامل لمقاومة التربة (هبوط كبير) وانقطاع كامل لنقل موجات القص (تسارع منخفض). أما لو جزأنا ما يحدث عند هذا العمق لمرحلة ما بين (0 – 4.03 ثانية) فنلاحظ بأن الحفر سبب اضطراباً في التربة حول الأساس، مما جعلها أكثر رخاوة، ومع بدء الاهتزاز، ترتفع ضغوط المسام بسرعة في هذه المنطقة المخربة. وآلية حدوث التسييل للمرحلة (عند 4.28 ثانية) فتصل المنطقة المخربة إلى التسييل الكامل محلياً ($r_u \approx 0.9$) وهذا يسبب انهياراً موضعياً للتربة حول الأساس وهبوطاً كبيراً (5.44 مم) لأن الأساس يفقد دعمه من الجوانب وانخفاضاً حاداً في التسارع (0.038g)، وذلك لأن التربة المسالة حول الأساس تمنع نقل موجات القص إلى المنشأ. أما المرحلة (بعد 4.28 ثانية) نلاحظ التالي: يستمر الاهتزاز، لكن التربة المسالة لا تنقل الحركة، فيبقى التسارع منخفضاً. ويزداد الهبوط نتيجة تبدد ماء المسام.

– أما عند العمق 0.05 m فنلاحظ بأنه قد حدث هبوط متوسط (1.95 مم) مع تسارع منخفض (0.049g) مما يدل على أن التسييل حدث لكن بشكل أقل شدة، ربما لأن قاعدة صندوق التربة الصلب حدّت من حدوث التشوهات. وتفسير آلية التسييل عند هذا العمق القرب من القاعدة الصلبة

لصندوق التربة الصلب يحد من قدرة التربة على التشوه بحرية، والحفر الأعمق قد يكون أقل إزعاجاً للتربة المحيطة (بسبب الإجهاد الذاتي الأعلى)، التسييل يحدث في طبقات ضحلة (ربما بين العمق 0 و 0.05 m) لكن لا يصل إلى القاعدة بسرعة حيث وجود حساس ضغط ماء المسام كما أن الهبوط أقل (1.95 مم) لأن الطبقة المتسيلة ضحلة، والتسارع منخفض (0.049g) لكنه ليس منخفضاً مثل حالة 0.03 m.

يعتبر عمق التأسيس 0.03 m (وهو يمثل 10% من ارتفاع الطبقة القابلة للتسييل) عمقاً حرجاً في هذه الدراسة، تعرف هذه الظاهرة في الأدبيات بـ ظاهرة العمق الحرج في التفاعل الديناميكي (Critical Depth) حيث:

يتوضع الأساس قريباً بما يكفي من السطح وبالتالي يقل التأثير المقيد للتربة السطحية الناتج عن الأساس، بحيث لا يُقيد بشكل كامل تشوهات التربة السطحية. الأساس ليس قريباً جداً من القاعدة (فتكون حركة التربة حرة)، حيث يكون الأساس بعيداً بما يكفي عن القاعدة الصلبة للصندوق (على عمق 25.5 سم) بحيث لا تُحد القاعدة من *تشوهات* القص. بصلة الإجهاد (وهي المنطقة داخل التربة التي تشهد زيادة ملحوظة في الإجهادات نتيجة الحمل المطبق القادم من الأساسات) تمتد في منطقة لا تتعارض مع القاعدة الصلبة (لا تصل إلى القاعدة حيث يتواجد حساس ضغط ماء المسام) وبالتالي فإن التربة المحيطة بالأساس تتشوه بحرية، مما يسمح بتطور ضغط المسام حتى الوصول للتسييل الكامل. وبالتالي كل ماسبق ذكره يفسر لماذا كان الهبوط عند العمق 0.03 m (5.44 مم) أكبر بكثير من الهبوط عند العمق 0 m (0.59 مم) والعمق 0.05 m (1.95مم).

وأخيرا وبتطبيق قانون التشابه حيث $prototype = \frac{model}{\text{معامل القياس الخاص}}$ تم ربط نتائج النموذج المستخدم في تجربة الطاولة الاهتزازية الموجودة في الجدول (3) بنتائج زلزال حقيقي على أرض الواقع فحصلنا على الجدول رقم (6). الجدول (5) يوضح معاملات القياس للنموذج الفيزيائي حسب (Iai, 1989). 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 المكافيء 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 أما قيمة الإجهاد الفعال الأولي في حالة السطح الحر تصبح 61.6 Kpa.

الجدول(5) يوضح معاملات القياس حسب (Iai, 1989) باعتبار $\lambda_p = 1, \lambda_\varepsilon = \lambda^{0.5}$

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	$\lambda^{0.5}$	$0.05^{0.5} \approx 0.224$

الجدول (6) يبين النتائج التجريبية الشاملة نتيجة اختبارات تأثير عمق الأساس على لحظة بدء التسييل بعد تطبيق نظرية التشابه حسب (Iai, 1989)

العمق	t_{liq} sec زمن بدء التسييل	P_{liq} mbar قيمة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل بالميلي بار	ΔU_{liq} Kpa قيمة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل بالكيلو باسكال	$r_u = \frac{u_{excess}}{\sigma'_{initial}}$ نسبة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل	$N_{liq}=t\times2$ عدد دورات التحميل حتى لحظة بدء التسييل	الهبوط (مم)	التسارع (g)
السطح الحر	20.80	624	62.4	1.014	4.41	----	----
0 سم	38.02	364.34	36.43	0.578	8.06	53.82	0.217
3 سم	40.38	348.64	34.86	0.551	8.56	494.73	0.038
5 سم	22.36	307.8	30.78	0.485	4.74	177.19	0.049

5-الاستنتاجات والتوصيات:

- تأثير العمق ليس خطياً: الأساس الأعمق ليس بالضرورة أن يكون هو الحل الأفضل أو الأسوأ. العمق 0.03 متر أعطى أسوأ حالة (أكبر هبوط، أسرع انهيار في التسارع) بينما العمق 0.05 متر أعطى تسييلاً مبكراً لكن هبوطاً أقل.
- حدوث تسييل موضعي: في الحالتين 0.03 متر و0.05 متر، حدث تسييل حتى مع عدم وصول r_u نسبة ضغط ماء المسام عند القاعدة إلى 0.9 حيث يوجد حساس ضغط ماء المسام، وهذا يؤكد أهمية وضع حساسات قياس ضغط ماء المسام في مواقع متعددة (وليس فقط في قاعدة العينة) لتحديد منطقة التسييل بدقة.
- العلاقة بين الهبوط والتسارع :الانخفاض الحاد في التسارع إلى g(0.038–0.049) كان مصحوباً بهبوط كبير، مما يؤكد أن قياس التسارع على المنشأ هو مؤشر موثوق لحدوث التسييل.
- العمق الحرج: يبدو أن عمق 0.03 متر (حوالي 10% من ارتفاع العينة) يمثل العمق الأكثر خطورة من حيث الهبوط والتسييل السريع.
- تأثير طريقة وضع الأساس: حفر حفرة ووضع الأساس فيها يخلق منطقة مخربة محيطة بالأساس أكثر عرضة للتسييل وهذا له آثار عملية على تصميم الأساسات في المناطق الزلزالية لذا يجب تجنب الحفر وإعادة الردم دون رص مناسب.
- تغير في مسار تصريف الماء: الأساس المدفون على عمق ضحل قد يعيق التصريف الرأسي للماء، مما يؤثر على توزيع ضغوط ماء المسام.
- ارتباط الهبوط بالتسارع: في حالة العمق الحرج يمكن استخدام هذه العلاقة لتطوير مؤشر تشغيلي للتسييل: إذا انخفض التسارع على المنشأ إلى أقل من 20% من تسارع الطاولة، فهذا يعني حدوث تسييل كامل وهبوط خطير.
- الربط بالواقع الهندسي: يجب دراسة عمق التأسيس بعناية في المناطق الزلزالية، فالعمق المتوسط (الحرج) قد يكون الأسوأ من حيث المخاطر، وليس بالضرورة أن يكون الأعمق دائماً هو الأفضل حيث تشير النتائج إلى وجود عمق معين (حوالي 10% من ارتفاع طبقة التربة القابلة للتسييل). كما يجب إعادة رص التربة حول الأساسات المدفونة بنفس معايير رص التربة الأساسية (أو أعلى) لتجنب خلق منطقة ضعيفة يمكن أن تسيل بسرعة.

- الدراسات المستقبلية: نوصي في الدراسات المستقبلية باختبار أعماق إضافية (مثل 10، 20، 40 مم) وأنواع تربة مختلفة ، وكثافات مختلفة، كما نوصي بعمل معايرة للنموذج باستخدام البرنامج الهندسي المثالي لتحديد دقيق لمدى تعميم هذه النسبة في الكودات الهندسية.

6-المراجع:

الابراهيم، مريم.، والعامودي، سليمان. (2021). تأثير تقوية الأعمدة باستخدام تقنية القميص البيتوني في السلوك الزلزالي للإطارات البيتونية المسلحة بفتحة واحدة. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (43)، العدد 14، 131-166.

المراد، وليد.، والحلواني، أمجد. (2021). دراسة الاستجابة الزلزالية للأبنية البيتونية العالية مع أخذ أثر التربة بعين الاعتبار. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (43)، العدد 18، 99-120.

فرج، براءة.، الجراش، علي.، والعامودي، سليمان. (2021). تقييم الاستجابة الزلزالية للجمل الإنشائية المختلطة غير منتظمة الصلابة شاقولياً باستخدام السجل الزمني المقيس. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (43)، العدد 16، 41-70.

Alaie, R., & Chenari, R. J. (2018). Design and performance of a single axis shake table and a laminar soil container. *Civil Engineering Journal*, *4*(6), 1326–1337

Amin, M., & Singh, M. (2024). A numerical study on the effect of liquefaction on ring footings during the 2001 Bhuj earthquake, Gujarat, India. *Discover Civil Engineering*, *1*(1), Article 9. https://doi.org/10.1007/s44290-024-00009-7.

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*, Article 105872. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105872.

Ben-Zeev, S., Goren, L., Parez, S., Toussaint, R., Clément, C., & Aharonov, E. (2017). The combined effect of buoyancy and excess pore pressure in facilitating soil liquefaction. In *Poromechanics VI* (pp. 107–116). HAL. hal.science.

Cerado, J. M. F. T., & Estores, G. B. (2025). Nonlinear seismic response analysis of a building foundation on liquefaction-prone soil in Padada, Davao del Sur. *Buildings*, *15*(2), Article 442. https://doi.org

Fadum, R. E. (1948). Influence values for estimating stresses in elastic foundations. *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, *3*, 77–84.

Gourvenec, S. M., & Randolph, M. F. (2009). Effect of foundation embedment on consolidation response. In Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Vol. 1, pp. 638–641). IOS Press. https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-638

Hīkina Whakatutuki. (2016). *Earthquake geotechnical engineering practice: Module 3. Identification, assessment and mitigation of liquefaction hazards*. New Zealand Geotechnical Society. https://nzgs.org.

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

Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Clarendon Press.

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

Lentini, V., Castelli, F., Cavallaro, A., & Grasso, S. (2019). A laboratory study for the dynamic characterization of sandy soil. In F. Silvestri & G. Moraci (Eds.), *Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions* (pp. 3568–3576). CRC Press/Taylor & Francis Group

Nguyen, D. V., & Ghalandarzadeh, A. (2023). A macroelement model for shallow and embedded foundations on liquefiable soils considering pore

pressure generation. *Computers and Geotechnics*, *155*, Article 105218. https://doi.org.

Olarte, J. C., Dashti, S., Liel, A. B., & Paramasivam, B. (2018). Effects of drainage control on densification as a liquefaction mitigation technique. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 110, 212–231. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.008

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

Qiu, Z., & Elgamal, A. (2020). Numerical simulation of seismic soil-pile-structure interaction in liquefiable ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *132*, Article 106059. https://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. https://doi.org.

Seed, H. B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, *92*(6), 105–134. https://doi.org.

Setyadi, G. P., Rifa'i, A., & Indrawan, I. G. B. (2024). Effects of soil liquefaction to foundation bearing capacity based on empirical and numerical simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1373*(1), Article 012011. https://doi.org.

Singh, V., Yadav, A. K., & Bano, S. (2019). A theoretical study of liquefaction process. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, *6*(1), 32–36.

Teixeira, F. (2024). Mechanisms to explain soil liquefaction triggering, development, and persistence during an earthquake. *Earthquake Science*. https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.07.003.

Varghese, R. M., & Gali, M. L. (2014). Shaking table tests to investigate the influence of various factors on the liquefaction resistance of sands. *Natural Hazards*, *73*(3), 1337–1351. https://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. https://doi.org.

Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O., & Makihara, Y. (1984). Undrained cyclic shear strength of dense Niigata sand. *Soils and Foundations*, *24*(4), 131–145. https://doi.org.

Zhang, C., Zhang, Q., Wu, Z., Zhang, J., Sui, T., & Wen, Y. (2015). Numerical study on effects of the embedded monopile foundation on local wave-induced porous seabed response. *Mathematical Problems in Engineering*, *2015*, Article 184621. https://doi.org/10.1155/2015/18462.

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. https://doi.org.