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.

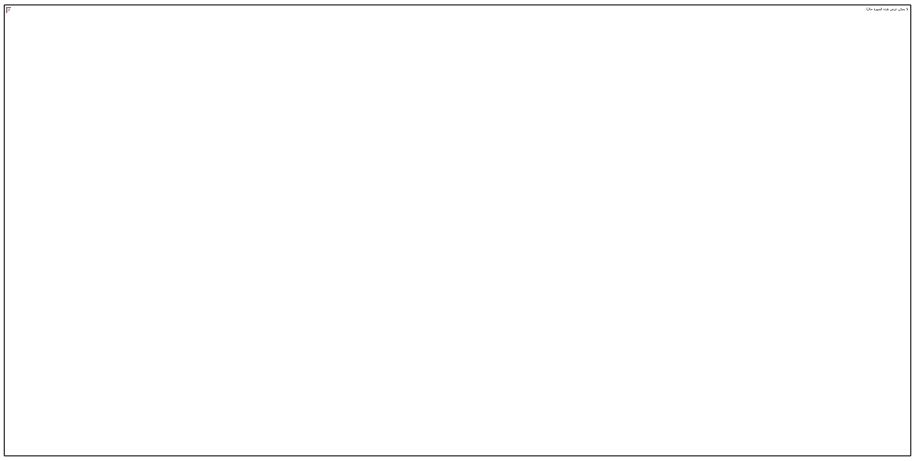
3- مواد وطرائق البحث.

3-1 توصيف الإطار المدروس:

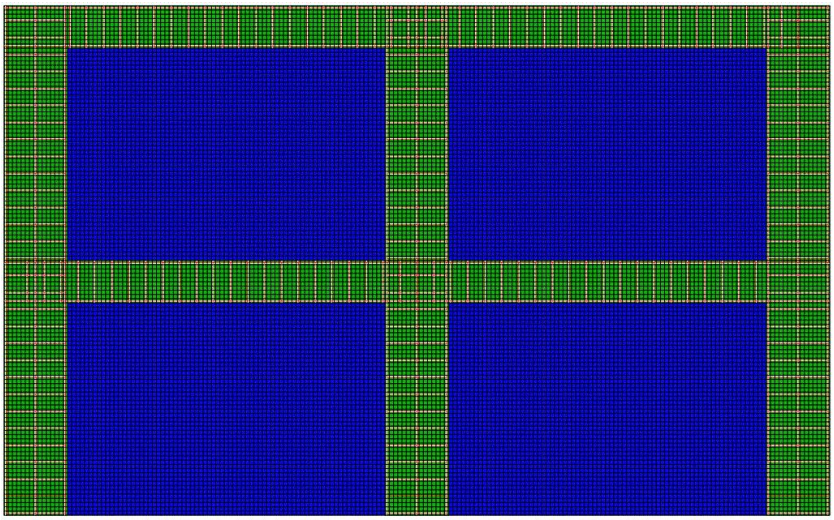
يبين الشكل (1) أبعاد النموذج المدروس المؤلف من طابقين و مجازين و موثوق في أسفل أعمدته بوثاقة تامة، فيه عطالة مقطع العمود أكبر من عطالة مقطع الجائز و مسلح باشتراطات الإطار المقاوم للعزوم وفق اشتراطات الكود**[1]**، الارتفاع الطابقي وعرض فتحة المجاز للإطار على الترتيب(**h=100 cm, b=150 cm**). كما يبين الشكل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

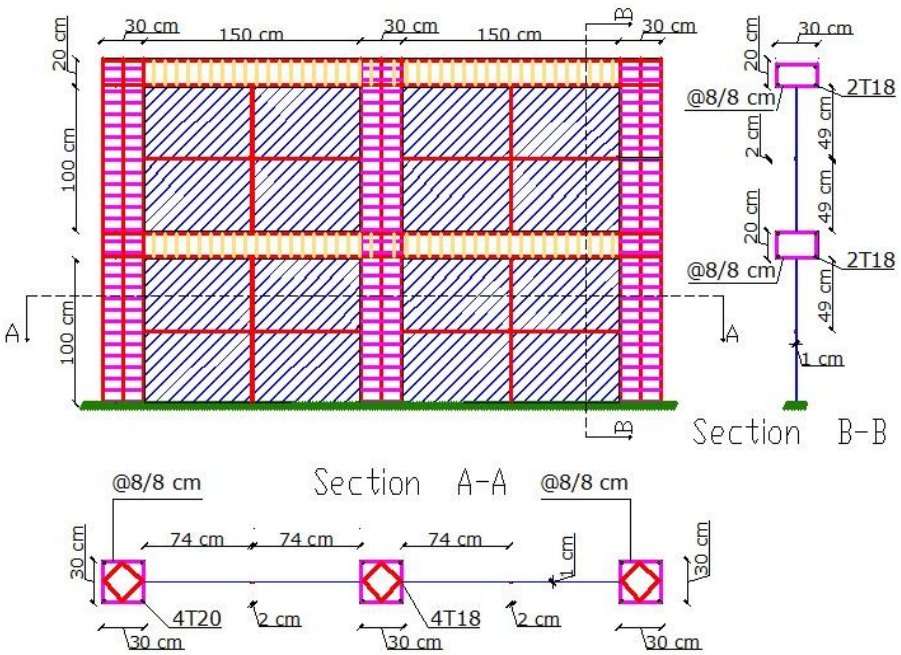
تمت نمذجة المدعمات المعدنية (Stiffeners) باستخدام العنصر (S4R).

D. طريقة تثبيت عناصر التقوية الإضافية.

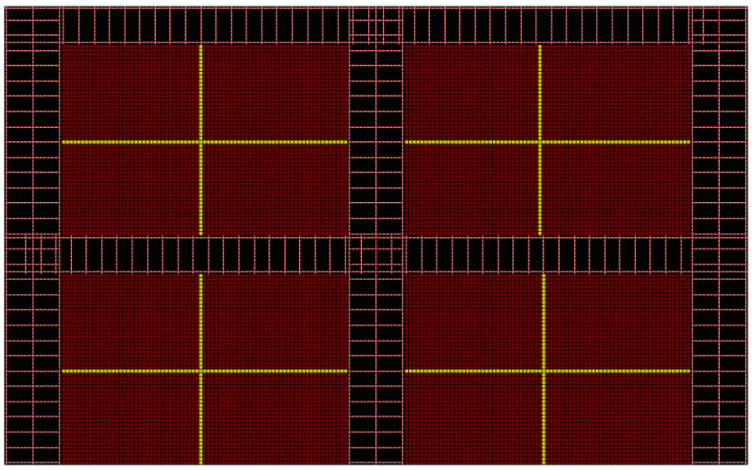
تم استعمال اللحام لتثبيت عناصر التدعيم على الصفيحة المعدنية.

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.

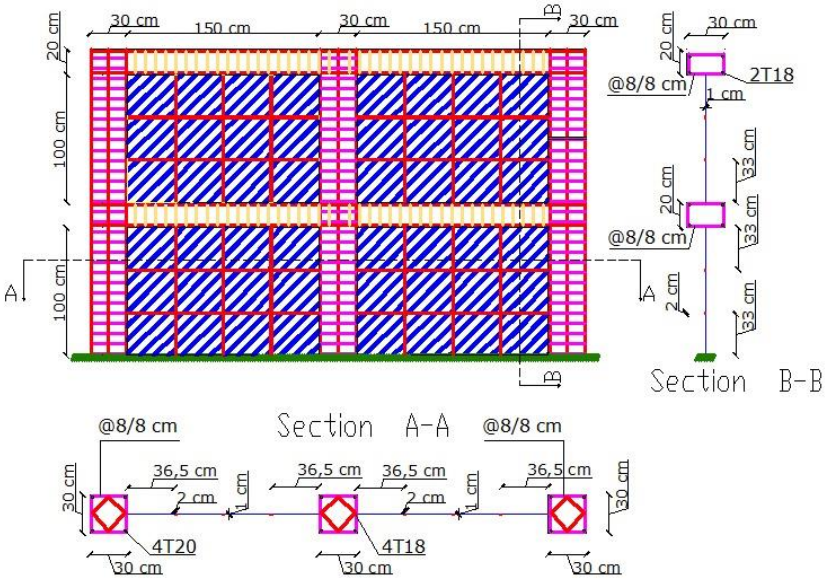


الشكل (3): الإطار مع الصفائح المعدنية المدعمة بالمدعمات، مدعمة أفقية والأخرى شاقولية (t_p **=2 mm**).

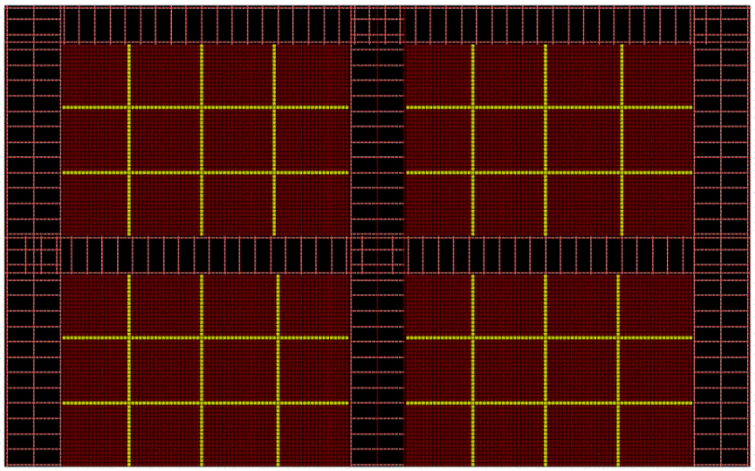


الشكل (4): الإطار المدعم بالصفائح المعدنية(**tp= 2 mm**) وبعناصر التقوية الإضافية المعدنية بعد نمذجته في برنامج **Abaqus (2026)**

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)**.

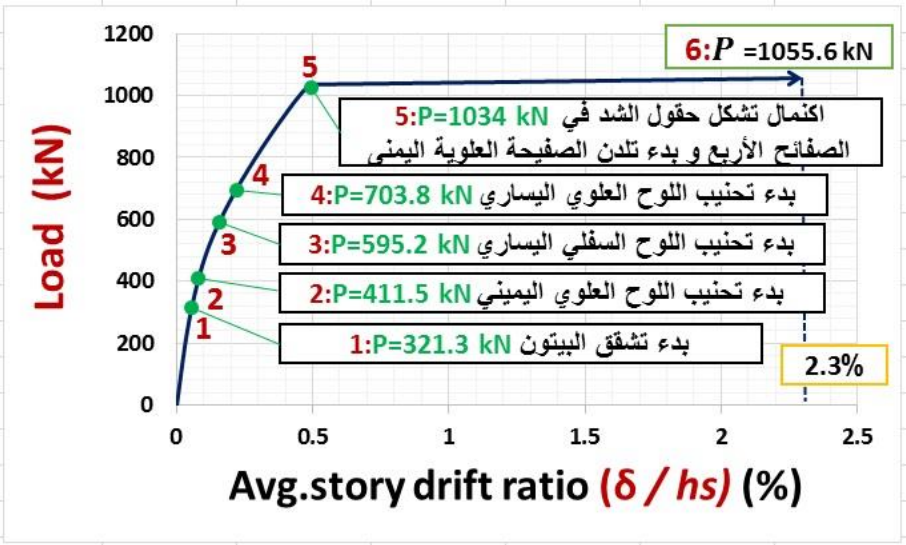
d) فولاذ عناصر التقوية و التدعيم المعدنية:

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.

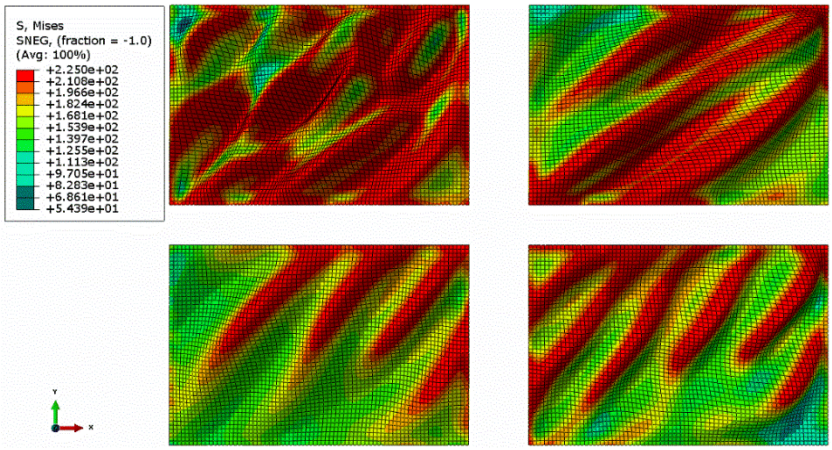


الشكل (7): مخطط قوة القص–الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية (**Avg.story drift ratio%**) للنموذج (**SPSW**) t_p (=2 mm).

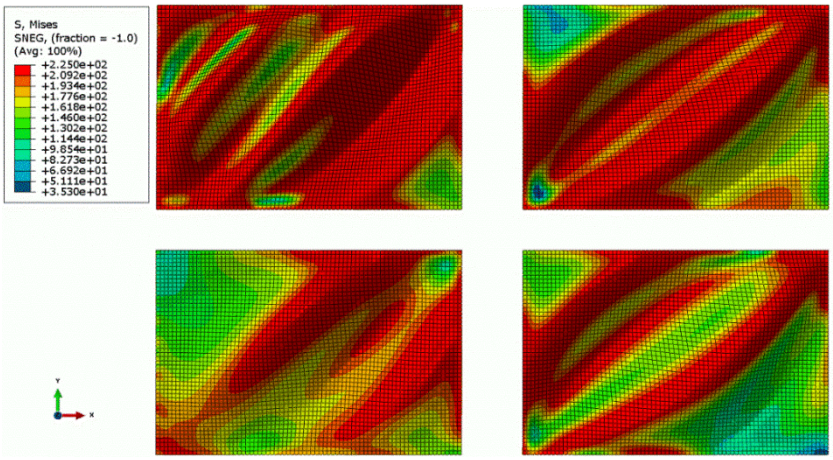
يبين الشكل (8) الشكل المتشوه عند النقطة المميزة (6) مع إجهاد (**Von Mises**) و قد وصل لقيمة إجهاد الخضوع ($f_y = 225\ MPa$) بالألواح الأربعة (t_p =2 mm)، وتنتشر نقاط الخضوع في جسم الصفائح المعدنية مبتعدة عن مراكز حقول الشد.

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**).



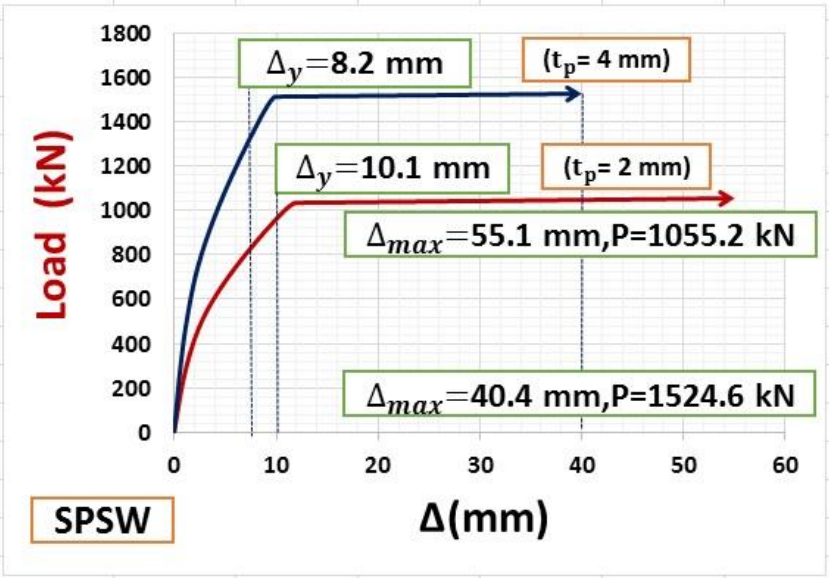
الشكل (9): الشكل المتشوه **(Deformed-shape)** مع إجهاد الخضوع فون ميسس **(Von-Mises)** لجملة الصفائح المعدنية فقط **(t_p= 4 mm)**.

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:

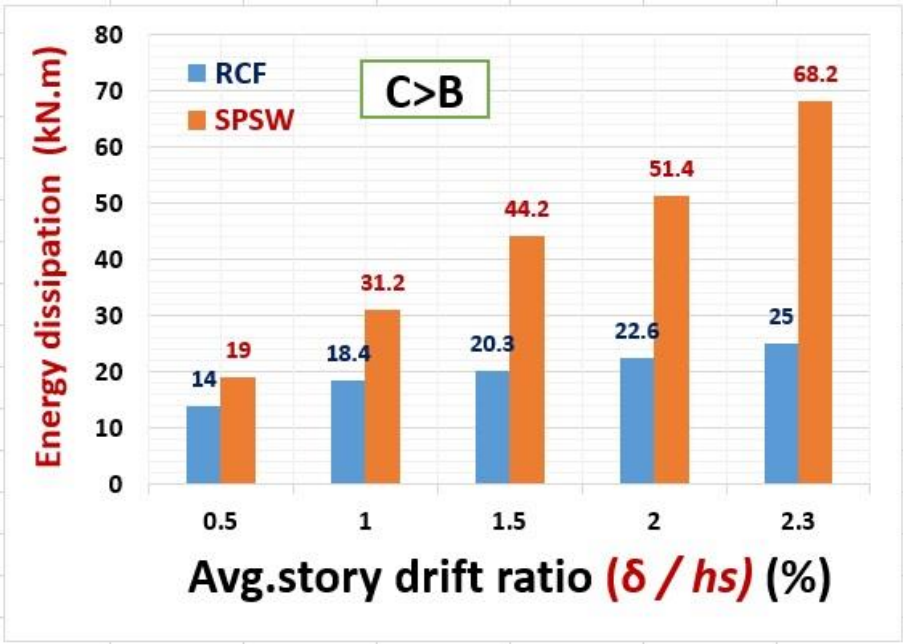
a) حالة النموذج (SPSW) (t_p= 2 mm).

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).

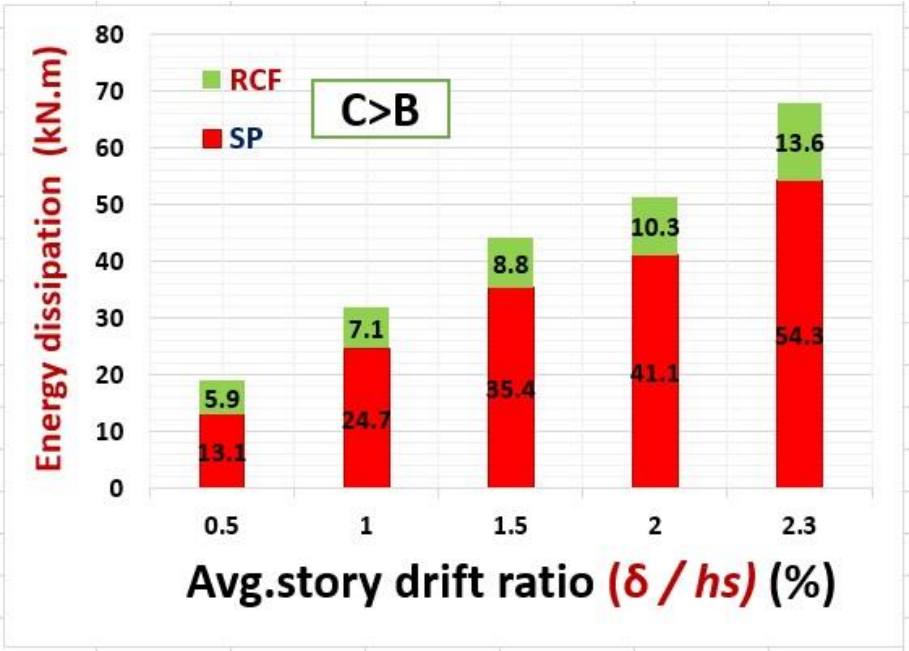
فيبين أنه عند (**Avg-story drift ratio%=0.5**) كانت الطاقة المبددة (**E=14 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=19 KN.m**) للنموذج (**SPSW**)، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة (**Avg-story drift ratio%=1.5**) أصبحت الطاقة المبددة (**E=20.3 KN.m**) للنموذج (**RCF**) و(**E=44.2 KN.m**) للنموذج (**SPSW**)، ومع انتهاء 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).

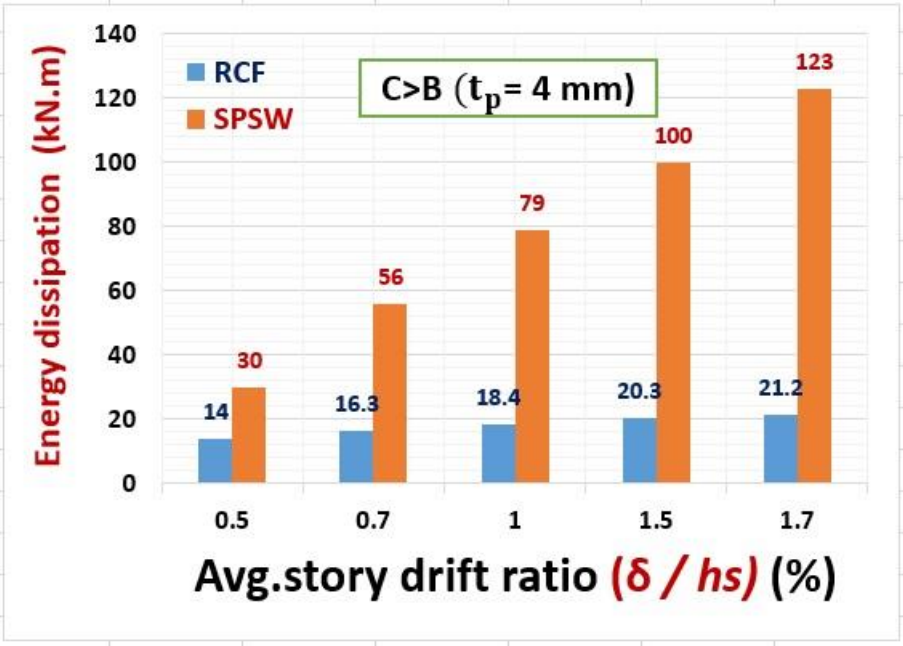
يبين الشكل (13) مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (**RCF**) و النموذج (**SPSW**)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية(**Avg-story drift ratio%**) والمحور الشاقولي يمثل قيمة الطاقة المبددة(**Energy dissipation kN.m**).

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**).

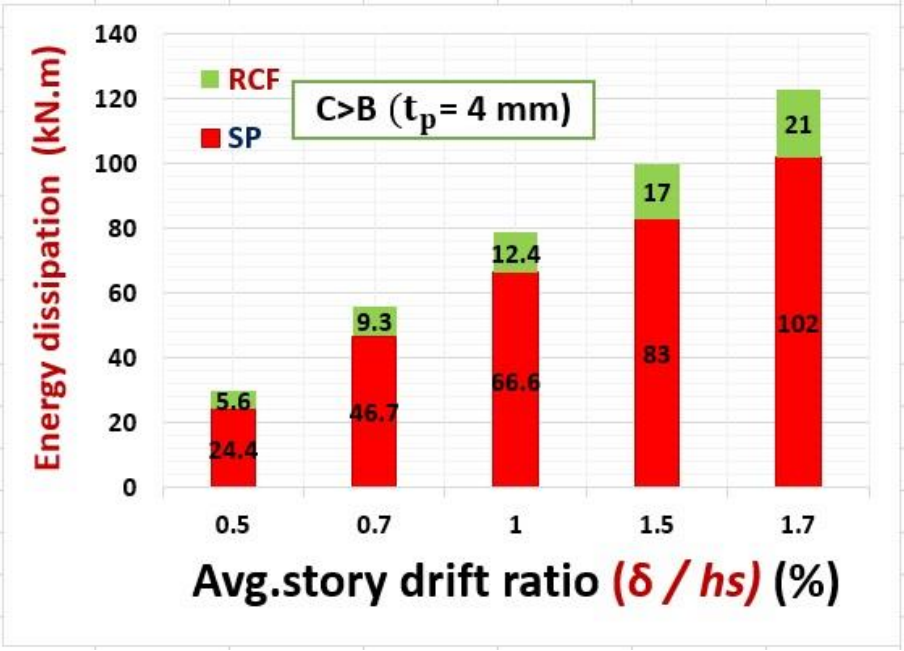
يبين الشكل (14) مقارنة بين الطاقة المبددة في الإطار البيتوني المسلح و في الصفائح المعدنية بالنموذج (**SPSW**)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية (**Avg-story drift ratio%**) والمحور الشاقولي يمثل الطاقة المبددة(**Energy dissipation kN.m**).

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:

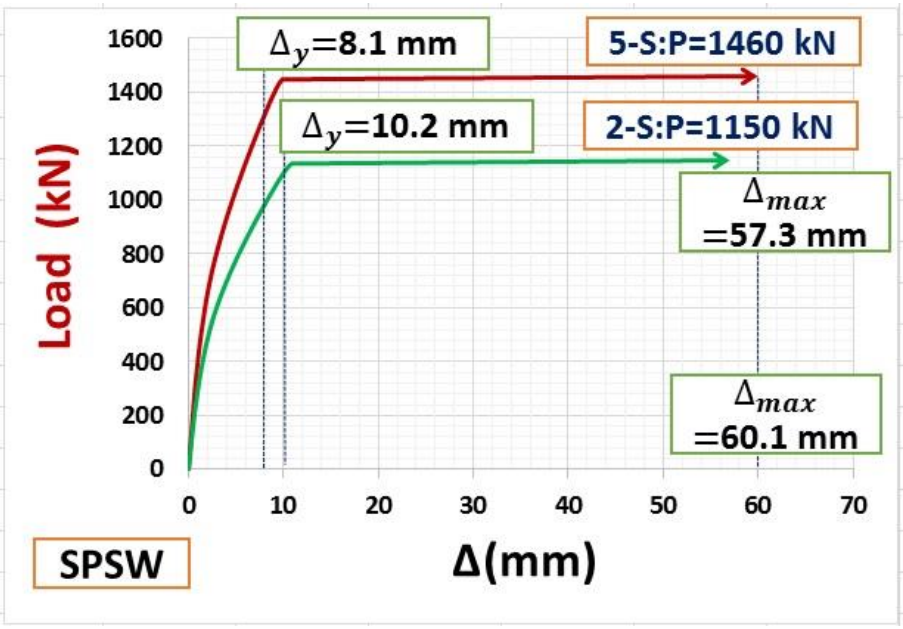
a) مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة معدنية(**S–2**).

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

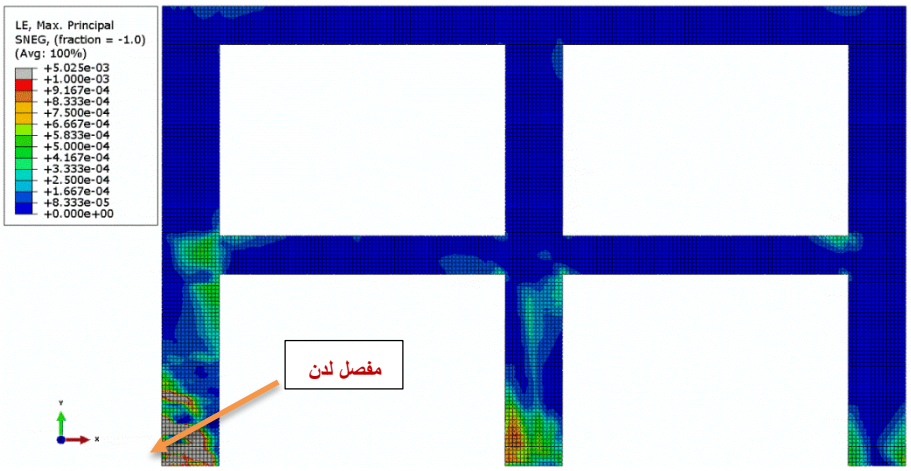
يبين الشكل أن الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية المدعمة بالمدعمات المعدنية (مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة) أبدى قدرة تحمل وصلت للقيمة (P=1150 kN) مع صلابة متوسطة نسبياً، ومطاوعة انتقال عالية نسبياً وصلت للقيمة ($\mu = \frac{\Delta_{Max}}{\Delta_y} = \frac{57.3}{10.2} = 5.62$).

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).

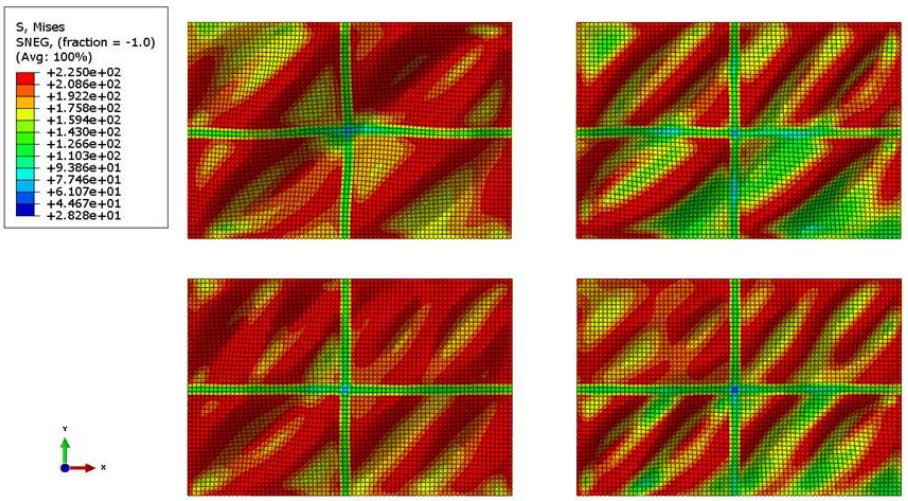


الشكل (15): مخطط قوة القص–الانتقال للنموذج (**SPSW**) مع المدعمات المعدنية(**S–2**) (**S–5**).



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) .

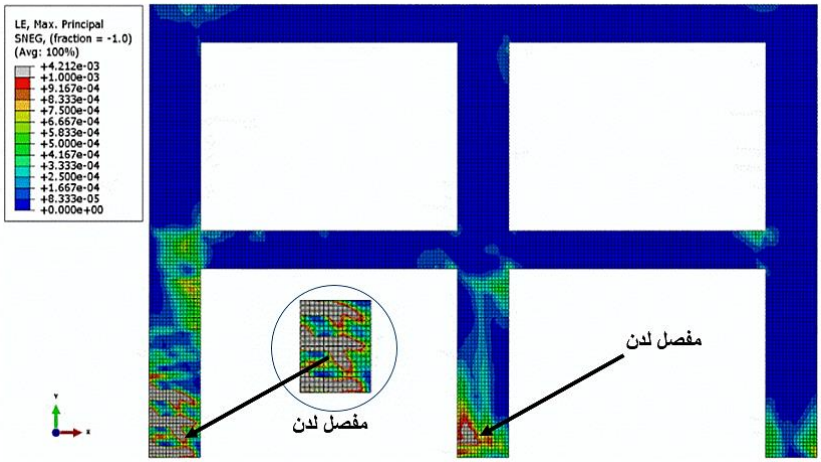


الشكل (17): الشكل المتشوه مع إجهاد الخضوع فون ميسس لجملة الصفائح المعدنية فقط **(t_p= 2 mm)**
(مدعمة أفقية والأخرى شاقولية لكل صفيحة)(S-2) .

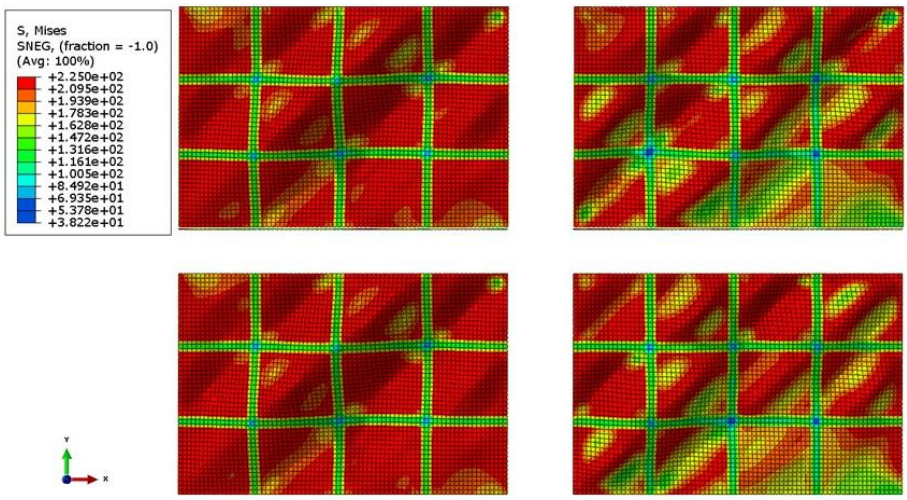
ويبين أيضاً الشكل (15) أن الإطار البيتوني المسلح مع الصفائح المعدنية المدعمة بالمدعمات المعدنية **(مدعمتين أفقيتين وثلاث مدعمات شاقولية لكل صفيحة معدنية)** أبدى قدرة تحمل أعلى من حالة

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).

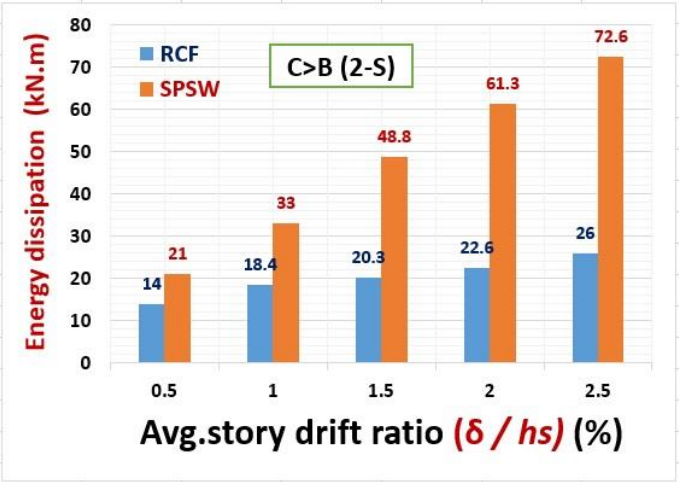
يبين الشكل (20) مقارنة الطاقة المبددة بين النموذج (**RCF**) و النموذج (**SPSW2**)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية كنسبة وسطية(Avg-story drift ratio%) والمحور الشاقولي يمثل قيمة الطاقة المبددة(Energy dissipation kN.m).

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**).

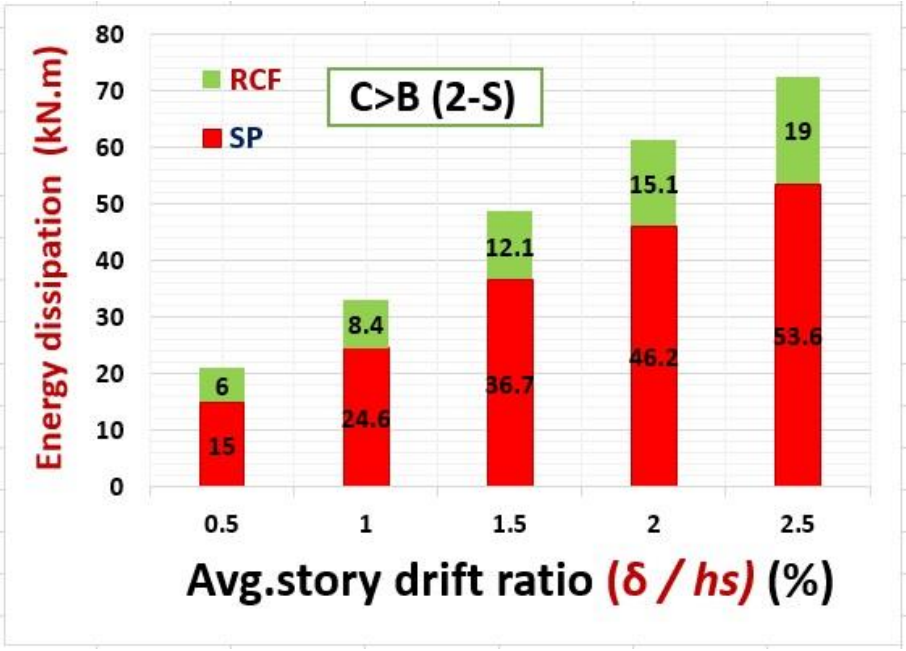
يبين الشكل (21) مقارنة بين الطاقة المبددة في الإطار البيتوني المسلح و في الصفائح المعدنية بالنموذج (**SPSW2**) (مدعمة أفقية و الأخرى الشاقولية)، فيه المحور الأفقي يمثل الإزاحة الطابقية

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**) .

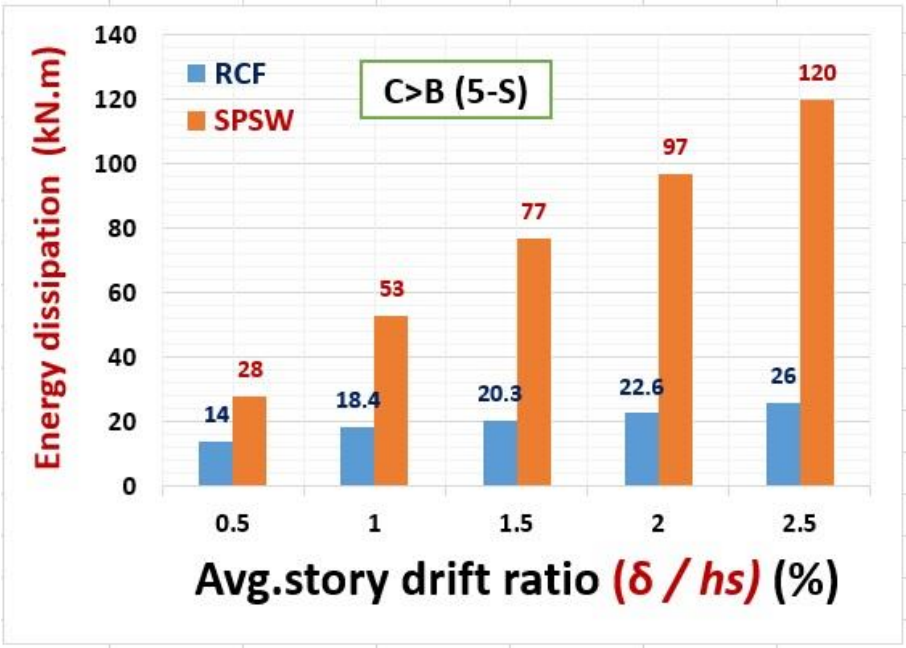


الشكل (21): مقارنة الطاقة المبددة بين الإطار البيتوني المسلح و الصفائح المعدنية في النموذج **(SPSW)** **(t_p= 2 mm)** **(مدعمة أفقية و الأخرى شاقولية)(2-S)** .

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)**.

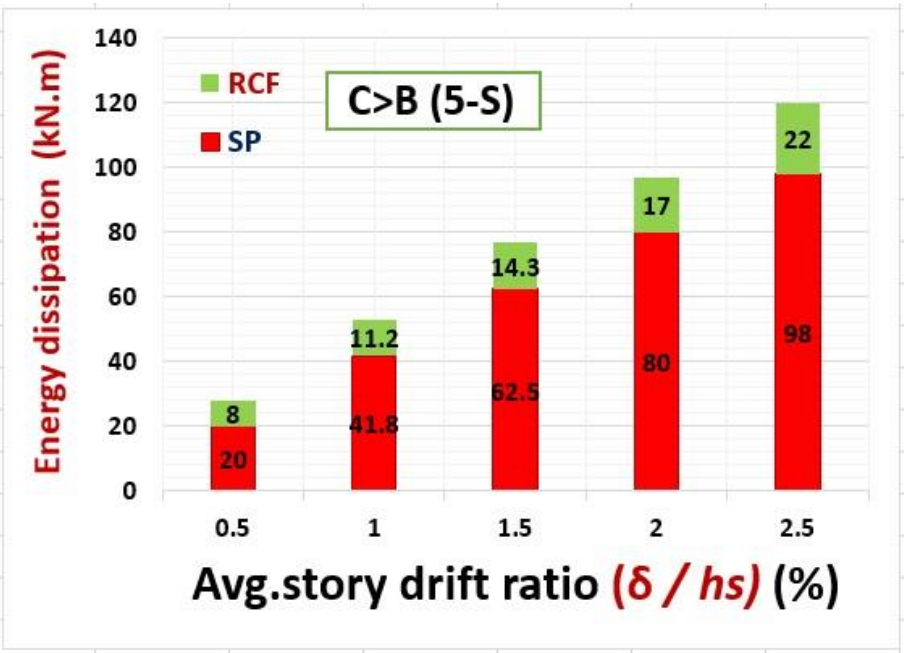
فيبين أنه عند **(Avg-story drift ratio%=0.5)** كانت الطاقة المبددة مساوية للقيمة **(E=14 KN.m)** للنموذج **(RCF)** و**(E=28 KN.m)** للنموذج **(SPSW)**، ومع تزايد التحميل ليصل لقيمة **(Avg-story drift ratio%=1.5)** أصبحت الطاقة المبددة مساوية للقيمة **(E=20.3 KN.m)** للنموذج **(RCF)** و**(E=77 KN.m)**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

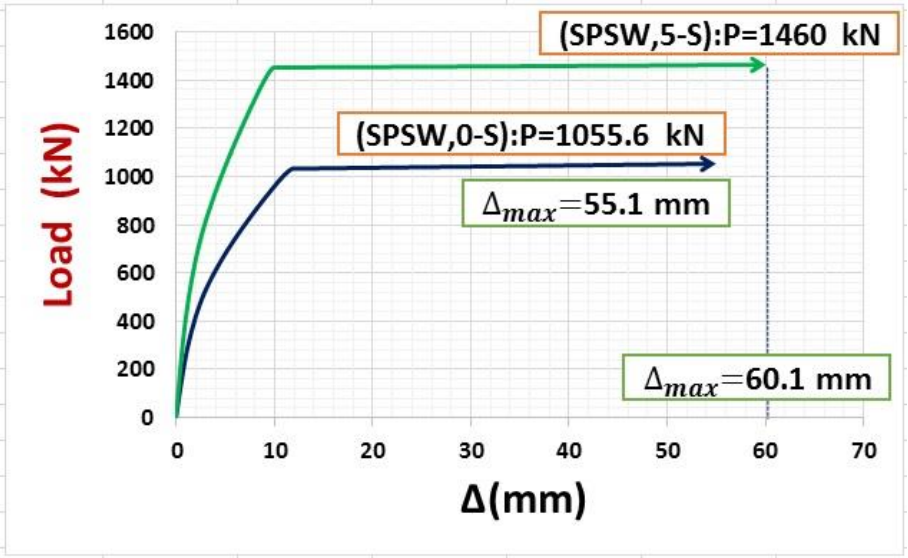
a) بدون مدعمات أفقية أو شاقولية **(SPSW,0–S)**.

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.**