مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد42 العدد (3) – 2026: 353- 370

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 42 number (3) -2026: 353-370

الدراسة العددية للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP باستخدام طريقة العناصر المحدودة

حسن أنور العطار[1*] طلال شرف[2] هشام المما[3]

[1*]. طالب دكتوراه، مهندس، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق.
hasan.alattar@damascusuniversity.edu.sy

[2]. أستاذ دكتور، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق.
D.talalsharaf@yahoo.com

[3]. دكتور مدرس، كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق، قسم الهندسة الإنشائية.
hishammamma@gmail.com

الملخص:

ظهرت حديثاً القضبان البولميرية المسلحة بالألياف البازلتية BFRP كبديل واعد لقضبان التسليح الأخرى من مركبات FRP نظراً للمزايا الإيجابية والمثبتة حتى الآن لهذه القضبان، ولكن مع ظهور هذه القضبان حديثاً وعدم اكتمال الدراسات المتعلقة بدراسة العناصر الإنشائية من الخرسانية المسلحة بها فإنها ماتزال غير مدرجة في الكودات العالمية الخاصة بالخرسانة المسلحة بقضبان FRP. من ناحية أخرى تعد النمذجة العددية والتحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة كإحدى الطرق المعتمدة والأكثر موثوقية بعد الدراسة التجريبية في الحصول على نتائج تقارب النتائج الحقيقية في النماذج التجريبية للعنصر المدروس، حيث تسمح ببناء العدد اللازم من النماذج العددية للعنصر المدروس وإجراء الدراسة البارامترية اللازمة للعوامل المختلفة المؤثرة على سلوك العنصر مع تحقيق التوفير من الناحية المادية والوقت اللازمين لإنشاء واختبار نفس النماذج تجريبياً. تهدف هذه الدراسة إلى بناء نماذج عددية باستخدام برنامج ABAQUS والذي يعتمد في التحليل على طريقة العناصر المحدودة لعدد من الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP المختبرة تجريبياً، والتحقق من صحة النمذجة العددية لإجراء دراسة بارامترية تستهدف دراسة أثر نسبة التسليح ومعامل المرونة الخاص بقضبان BFRP على قيم السهم والتشوهات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح والخرسانة في النماذج العددية للجوائز المدروسة. خلصت النتائج إلى وجود توافق جيد بين القيم الناتجة من الدراسة العددية والتجريبية للجوائز المدروسة، كما بينت النتائج دور زيادة نسبة التسليح في انخفاض التشوهات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح والسهم المتشكل وسط المجاز في نماذج الجوائز الخرسانية المدروسة والمسلحة بقضبان BFRP، و تأثير انخفاض معامل مرونة قضبان BFRP في زياد قيم التشوهات النسبية لقضبان التسليح والسهم الحاصل وسط المجاز للجوائز المسلحة بقضبان BFRP مقارنة بالجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية، كذلك بينت النتائج أن سوية الحمل الموافقة 30% من العزم المقاوم عند الانهيار للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP تعد سوية حمل متحفظة ولصالح الأمان أذا ما تم اعتبارها كسوية للأحمال الخدمية التي يمكن أن يتعرض لها الجائز خلال مرحلة الاستثمار.

الكلمات المفتاحية: قضبان BFRP، الجوائز الخرسانية المسلحة، طريقة العناصر المحدودة، التشوهات النسبية، السهم.

تاريخ الإيداع:2023/9/27
تاريخ القبول: 2023/12/6

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب CC BY-NC-SA

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

Numerical Study of Concrete Beams Reinforced With BFRP Bars Using the Finite Element Method

Hasan Anwar Al attar[*1] Talal Sharaf[2] Hisham Al mamma[3]

[*1] PhD student, The Department of Structural Engineering _ Faculty of Civil Engineering, Damascus University.
hasan.alattar@damascusuniversity.edu.sy

[2] Professor at the Department of Structural Engineering _ Faculty of Civil Engineering Damascus University.
D.talalsharaf@yahoo.com

[3] Teacher at the Department of Structural Engineering _ Faculty of Civil Engineering Damascus University.
hishammamma@gmail.com

Abstract:

Recently, Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) bars have emerged as a promising alternative to other FRP reinforcement bars, owing to their proven and positive advantages. However, due the recent appearance of these bars and the incompleteness of studies on structural elements reinforced with them, they are not yet incorporated into international codes for concrete reinforced with FRP bars. On the other hand, numerical modeling and structural analysis using the Finite Element Method (FEM) are among the approved and most reliable methods after experimental studies for obtaining results that are close to the real results in experimental models of the studied element, it allows building the necessary number of numerical models of the studied element and conducting the necessary parametric study of the various factors affecting the element's behavior while achieving cost and time savings compared to constructing and testing the same models experimentally. This study aims to build numerical models using ABAQUS software, which relies on the Finite Element Method, for a number of concrete beams reinforced with BFRP bars that have been tested experimentally, and to verify the validity of the numerical modeling by conducting a parametric study to investigate the impact of the reinforcement ratio and the elastic modulus of BFRP bars on the values of the deflection and the strain occurring in the reinforcement bars and the concrete in the numerical models of the studied beams. The results indicate a good agreement between the values obtained from the numerical and experimental studies of the beams, and demonstrate the role of increasing the reinforcement ratio in reducing the strain occurring in the reinforcement bars and the deflection formed at the mid-span of the studied concrete beams models reinforced with BFRP bars, they also show that decreasing the elastic modulus of BFRP bars increases the values of strain of the reinforcement bars and the deflection in the mid-span of beams reinforced with BFRP bars, compared to beams reinforced with steel bars, the results also indicate that the load level corresponding to 30% of the ultimate capacity at Failure of concrete beams reinforced with BFRP bars is a conservative and favors safety if it is considered a load level for service loads that the beam may be exposed to during the serviceability phase.

Keywords: BFRP Bars, Reinforced Concrete Beam, Finite Element Method, strain, deflection.

Received: 27/9/2023
Accepted: 6/12/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a
CC BY- NC-SA

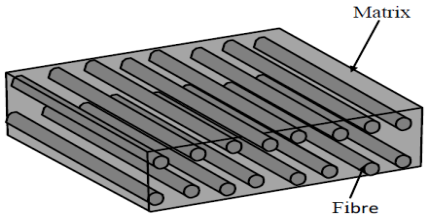
المقدمة:

تعد مشكلة تآكل فولاذ التسليح في العناصر الإنشائية المختلفة من التحديات الكبيرة التي تواجه صناعة التشييد باستخدام الخرسانة المسلحة بالقضبان الفولاذية التقليدية، وعلى وجه الخصوص في البيئات ذات الرطوبة العالية، وبعض البيئات العدوانية الحاوية على أيونات الكلوريد مثل بعض المنشآت البحرية والجسور الطرقية (Ahmad, 2003, 470).

خلال العقدين الماضيين ظهرت قضبان من مركبات FRP (البوليمرات المسلحة بالألياف) كبديل واعد لحل مشاكل التآكل المرتبطة بالقضبان الفولاذية، ونظراً للمزايا الإيجابية الأخرى التي توفرها هذه القضبان في صناعة التشييد باستخدام الخرسانة المسلحة، كخفة الوزن وقوة الشد الحدية الكبيرة عند الانقطاع عند الشد باتجاه الألياف.

(Nanni, 1993, 3358)، (Wu et al., 2007, 7).

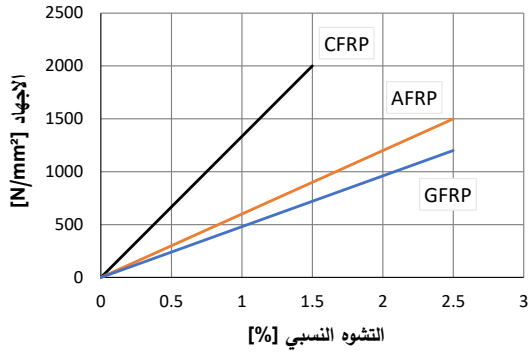
تتألف البوليمرات المسلحة بالألياف من مواد متجانسة (Isotropic) هي الألياف (Fiber) التي تؤمن المقاومة العالية على الشد، ومن مادة رابطة (Matrix) تربط الألياف مع بعضها، وتؤمن نقل الحمولة بين الألياف بالإضافة إلى حماية الألياف من المؤثرات البيئية، لينتج مادة مركبة (Composite Material) غير متجانسة الخواص (Orthotropic) كما بالشكل (1).



الشكل (1) مكونات المواد المركبة للبوليمرات المسلحة بالألياف.

(Obaidat, 2011, 19)

تتميز مركبات FRP عموماً بالسلوك الخطي المرن حتى الانقطاع وقوة الشد العالية باتجاه الألياف، مع عدم وجود حد الخضوع الذي يتميز به فولاذ التسليح التقليدي، والشكل (2) يبين مخطط (التشوه النسبي–الاجهاد) للأنواع الشائعة من مركبات FRP.



الشكل (2) مخطط (التشوه النسبي–الاجهاد) على الشد المحوري للأنواع الشائعة من مركبات FRP (CEB-FIP, 2010, 215).

تعد الألياف الزجاجية الأكثر شيوعاً في صناعة قضبان التسليح من مركبات FRP، وبدرجة أقل الألياف الكربونية والأراميدية نظراً لارتفاع تكلفة انتاجها، ولكن مع تطور تكنولوجيا التصنيع المرتبطة بإنتاج قضبان التسليح من مركبات FRP ظهرت حديثاً الألياف البازلتية كمنافس واعد للألياف الزجاجية في صناعة قضبان FRP نظراً للمزايا الإيجابية والمثبتة حتى الآن التي توفرها القضبان البوليميرية المسلحة بهذه الألياف مقارنة بقضبان GFRP، كقوة الشد الأعلى، المقاومة الكيميائية الأفضل، والمجال الأوسع في تحمل درجات الحرارة التي يمكن أن يتعرض لها المنشأ خلال مرحلة الاستثمار (Chowdhury et al., 2022, 1)، كما تعد الصناعة المرتبطة بتشكيل الألياف البازلتية وهي المكون الرئيسي لقضبان BFRP أفضل من الناحية البيئية بالمقارنة مع صناعة الألياف الزجاجية، حيث تتطلب طاقة أقل والأبخرة الناتجة عنها تكون أقل سميّة، فضلاً عن توافر المواد الأولية لهذه الصناعة وهي الصخور البازلتية في معظم دول العالم (InfoMine Research Group, 2007)،

(Wu et al., 2012, 2)، لكن من ناحية أخرى ومع ظهور قضبان BFRP حديثاً وعدم اكتمال الدراسات المتعلقة بدراسة العناصر الإنشائية من الخرسانية المسلحة بها فإن هذه القضبان ماتزال غير مدرجة في الكودات العالمية الخاصة بالخرسانة المسلحة بقضبان من مركبات FRP مثل CEB-FIP (2007)، ACI 440.1R (2015) وملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018)، حيث تعد الدراسات المتعلقة بدراسة سلوك الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP قليلة نسبياً بالمقارنة مع الدراسات المتوافرة حول استخدام القضبان من مركبات FRP الأخرى وخاصة الزجاجية GFRP، فضلاً عن افتقار معظم هذه الدراسات إلى الدراسة العددية، من هذه الدراسات دراسة أجراها Lapko وآخرون (2015) شملت اختبار عدد من الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان

BFRP، حيث خلصت النتائج التجريبية للجوائز المختبرة إلى وجود تباينات مهمة وملحوظة بين القيم التحليلية وفق عدد من الصيغ الحسابية المعتمدة لحساب السهم والقيم التجريبية في الجوائز المختبرة، وأكد ذلك Elgabbas وآخرون في دراسة لهم عام (2016) والتي توصلوا فيها أيضاً إلى وجود تباين مهم بلغت نسبته 28% بين متوسط العزم المقاوم وفق (ACI 440.1R, 2015) والعزم الذي انهارت عنده الجوائز الخرسانية المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP. بالمقابل تعد الدراسة التجريبية للعناصر الإنشائية المختلفة من الخرسانة المسلحة ومنها الجوائز المسلحة بقضبان BFRP من الأعمال التي تتطلب تكلفة مادية ووقت وخاصة عند الحاجة إلى إنشاء عدد كبير من النماذج لدراسة أثر المتغيرات المختلفة التي يمكن أن تؤثر على سلوك هذه الجوائز، وهنا تأتي النمذجة العددية والتحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة FEM (Finite Element Method) كإحدى الطرق المعتمدة والأكثر موثوقية بعد الدراسة التجريبية في الحصول على نتائج تقارب النتائج الحقيقية في النماذج التجريبية للعنصر المدروس، حيث تسمح ببناء العدد اللازم من النماذج العددية للعنصر المدروس وإجراء الدراسة البارامترية اللازمة للعوامل المختلفة المؤثرة على سلوك العنصر، وبالتالي يمكن أن تحقق الهدف من الدراسة مع تحقيق التوفير من الناحية المادية والصعوبات التي يمكن أن تواجه الباحث من حيث تواخي الدقة اللازمة فضلاً عن الوقت اللازم لإتمام مرحلتي إنشاء النماذج التجريبية و اختبارها (Salih et al., 2019, 2296) (Demir et al., 2016, 13)، وفي هذا السياق فإنه يمكن اعتبار الدراسة العددية للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP من العوامل التي تساعد في فهم أعمق وإعطاء صورة أوضح لأثر المتغيرات المختلفة التي قد تؤثر على سلوك هذه الجوائز، أكد ذلك PAWLOWSKI وآخرون (2015) في دراسة لهم شملت دراسة تجريبية وعددية باستخدام برنامج ABAQUS لعدد من الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP، حيث أظهرت النتائج وجود توافق جيد بين نتائج الدراسة العددية و التجريبية للجوائز المدروسة، كما أكد الباحثون على أهمية الدارسة العددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة وإمكانية استخدام هذه الطريقة في الحصول على نتائج دقيقة وبدرجة جيدة من الموثوقية جنباً إلى جنب مع الدراسة التجريبية للجوائز المختبرة في الدراسة، وفي دراسة أخرى قام بها CARTER وآخرون (2019) شملت دراسة تجريبية وعددية باستخدام برنامج ABAQUS لثلاثة جوائز خرسانية مسلحة بقضبان BFRP، خلص الباحثون إلى التأكيد على أهمية الدارسة العددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة وضرورة معايرة أثر تقارب الشبكة (Mesh Convergence) للنماذج العددية المدروسة.

تهدف هذه الدراسة إلى بناء نماذج عددية باستخدام برنامج ABAQUS والذي يعتمد في التحليل على طريقة العناصر المحدودة لعدد من الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP والمختبرة تجريبياً، ومعايرة صحة النمذجة العددية، ومن ثم إجراء دراسة بارامترية تستهدف دراسة أثر نسبة التسليح وانخفاض معامل المرونة الخاص بقضبان BFRP على قيم السهم والتشوهات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح والخرسانة في النماذج العددية للجوائز المدروسة.

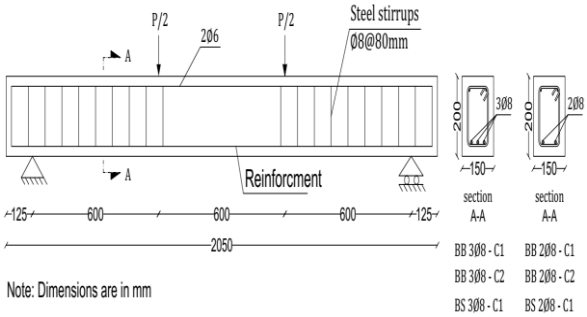
2. توصيف النماذج المختبرة تجريبياً:

1.2 الخرسانة:

تم استخدام مقاومتين للخرسانة على الضغط C1 و C2. المقاومة المميزة الاسطوانية على الضغط مساوية إلى 26.4 MPa و35.6 MPa لكل من C1 و C2 على التوالي. الاسمنت المستخدم هو الاسمنت البورتلاندي البوزلاني Type II ماركة 42.5، و القطر الاسمي الأعظمي للركام الخشن المستخدم يساوي 25 mm، ونسبة الماء إلى الاسمنت W/C مساوية إلى 0.49 و 0.4 للخلطتين C1 و C2 على التوالي.

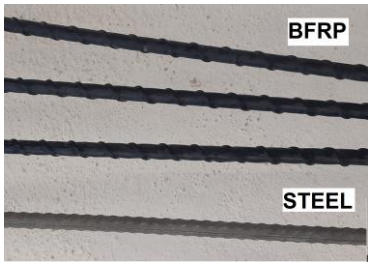
2.2 قضبان التسليح:

القضبان البوليميرية المسلحة بالألياف البازلتية BFRP



الشكل (4) تفاصيل التسليح والأبعاد لنماذج الجوائز المختبرة

المستخدمة ذات سطح محلزن (Ribbed Surface) كما في الشكل (3)، مؤلفة من ألياف بازلتية مستمرة ذات قطر يتراوح بين 10 و22 ميكرون مشربة براتنج فينيل الاستر (vinyl-ester)، ومحتوى الألياف (حجماً) هو 70 % من الحجم الكلي، وهو ما يتفق مع المواصفة ASTM D3171 (2011) وملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018)، أما قضبان التسليح الفولاذية المستخدمة كتسليح رئيسي ولتشكيل الأساور فهي ذات سطح محلزن كما بالشكل (3)، بينما قضبان التعليق العلوية ملساء بقطر 6 mm، والجدول (1) يبين ملخص الخصائص الميكانيكية لقضبان التسليح المستخدمة في نماذج الجوائز المختبرة.



الشكل (3) يبين سطح قضبان BFRP والقضبان الفولاذية المستخدمة بالبحث.

الجدول (1) الخصائص الميكانيكية لقضبان BFRP والقضبان الفولاذية المستخدمة في البحث.

نوع مادة القضيب	القطر (mm)	الاستخدام	معامل المرونة E_f (GPa)	الإجهاد الحدي f_{fu} (MPa)	اجهاد السيلان f_y (MPa)	التشوه النسبي الحدي (%)
BFRP	8	رئيسي سفلي	44.5	1157	–	2.6
Steel		رئيسي سفلي و عرضي	210	–	420	0.2
Steel	6	تعليق علوي	210	–	240	0.11

3.2 نماذج الجوائز المختبرة:

تتضمن الدراسة التجريبية اختبار ستة جوائز خرسانية مسلحة بسيطة الاستناد تحت تأثير قوتين مركزتين، أربعة منها مسلحة بقضبان BFRP، وجائزان مرجعيان مسلحان بالقضبان الفولاذية للمقارنة، والشكل (4) يبين نماذج الجوائز المختبرة وتوزع قضبان التسليح الطولي والعرضي ضمن الجائز. يبلغ مجاز كل جائز 1800 mm والمقطع العرضي 150 mm *200، وسماكة التغطية لقضبان التسليح العلوية والسفلية مساوية إلى 25 mm.

تم تصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP وفق الكود الأمريكي ACI 440.1R (2015) لتنهار على الضغط، حيث نسبة تسليحها أكبر تماماً من نسبة التسليح التوازنية التي توافق وصول الاجهاد في قضبان BFRP إلى القيمة الحدية عند الانقطاع بالتزامن مع وصول الانفعال في الخرسانة المضغوطة إلى القيمة الحدية، في حين تم تصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بالقضبان الفولاذية لتنهار على الشد حيث نسبة تسليحها أصغر تماماً من نسبة التسليح التوازنية، وهو النمط التقليدي لتصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بالقضبان الفولاذية، حيث تفرض طبيعة الانهيار الهش لكل من الخرسانة وقضبان التسليح من مركبات FRP أن يكون الانهيار في المقاطع الخرسانية المسلحة بقضبان FRP والمعرضة لعزوم انعطاف هشاً أيضاً، وعليه تعتمد الفلسفة الخاصة بتصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان من مركبات FRP على جعل الانهيار يحدث في منطقة الخرسانة المضغوطة (انهيار هش)، وذلك عكس الفلسفة الخاصة بتصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بالقضبان الفولاذية حيث يكون الانهيار على الشد (انهيار مطاوع) بوصول الاجهاد في قضبان التسليح الفولاذية إلى اجهاد السيلان (ملحق الكود العربي السوري رقم 18، 67). الجدول (2) يبين ملخص لنماذج الجوائز المختبرة ونسبة التسليح والمقاومة المميزة الاسطوانية للخرسانة على الضغط لكل جائز.

الجدول (2) نماذج الجوائز المختبرة ونسبة تسليحها.

التسلسل	الجائز	نسبة التسليح ρ_f	ACI 440.1R (2015)	
			نسبة التسليح التوازنية ρ_{fb}	ρ_f/ρ_{fb}
1	BB 2Ø8 – C1	0.0041	0.0017	2.41
2	BB 2Ø8 – C2	0.0041	0.0022	1.86
3	BB 3Ø8 – C1	0.0061	0.0017	3.59
4	BB 3Ø8 – C2	0.0061	0.0022	2.77
5	BS 2Ø8 – C1	0.0041	0.0286	0.14
6	BS 3Ø8 – C1	0.0061	0.0286	0.21

ملاحظة على الجدول (2):

الرمز الأول من اسم الجائز "B" للدلالة على الجائز.

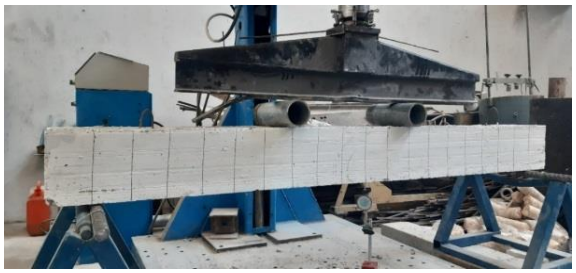
الرمز الثاني من اسم الجائز "B" أو "S" للدلالة على نوع مادة قضبان التسليح السفلي الرئيسي، حيث B للدلالة على قضبان BFRP و S للدلالة على القضبان الفولاذية.

الرمز "3–2Ø8" للدلالة على عدد القضبان وقطرها.

الرمز "C2, C1" للدلالة على المقاومة المميزة الاسطوانية للخرسانة على الضغط.

4.2 إجراءات وآلية الاختبار:

تم توزع القوة المركزة الكلية المطبقة التي يولدها جهاز الاختبار إلى قوتين مركزتين ومتساويتين عبر جسر معدني أعلى الجائز المختبر كما بالشكل (5)، بحيث تبعد كل قوة منهما مسافة 600 mm عن المسند المجاور.



الشكل (5) جهاز وألية الاختبار.

تضمن طريقة التحميل السابقة تعرض المجاز الوسطي للجائز بين نقطتي التحميل إلى عزم انعطاف صافي تحت تأثير القوتين المركزتين المطبقتين على الوجه العلوي للجائز، بحيث تكون اجهادات الشد الناتجة عن العزم المطبق عند الوجه السفلي، بينما تكون اجهادات الضغط على الوجه العلوي. تم قياس السهم الحاصل أثناء الاختبار عن طريق تثبيت ساعة قياس التشوه بدقة 0.01 mm في منتصف المجاز أسفل الجائز كما بالشكل (5). تبلغ الاستطاعة القصوى لجهاز الاختبار 350 kN، مع إمكانية التحكم بمعدل تزايد القوة التي يولدها، حيث تم تطبيق هذه القوة بتزايد ثابت مساوياً إلى (1.5 kN/SEC). تم طلاء أوجه الجائز بطلاء أبيض وتخطيطها وفق تقسيمات معينة وذلك لتسهيل عملية مراقبة أماكن تشكل الشقوق الحاصلة أثناء الاختبار.

3. التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة:

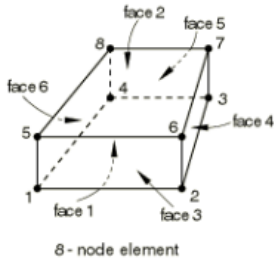
1.3 توصيف النماذج العددية للجوائز المختبرة باستخدام برنامج (ABAQUS 6.14-4):

1.1.3 الشروط المحيطية للنموذج المدروس:

تم اعتماد شروط الاستناد في النماذج العددية للجوائز المختبرة كما اعتمدت في التجربة، حيث المسند اليساري بسيط وثابت (Fixed Support) وذلك بمنع العقدة التي تمثله من الانتقال الأفقي والشاقولي، بينما المسند اليميني بسيط ومتدحرج (Roller Support) وذلك بمنع العقدة التي تمثله من الانتقال الشاقولي فقط. تم تطبيق قوتين مركزتين تبعد كل منهما عن المسند المجاور $600\ mm$، مع اعتماد تحليل لا خطي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة (MNA) Materially Non-Linear Analysisو افتراض التماسك تام من نوع (Embedded Region) بين الخرسانة وقضبان التسليح.

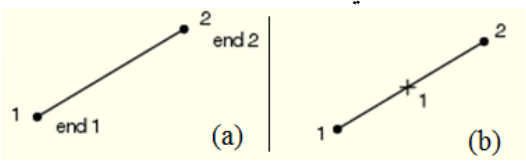
2.1.3 العناصر المستخدمة في النمذجة:

تم استخدام العنصر C3D8R لنمذجة مادة الخرسانة، وهو عنصر فراغي مؤلف من ثماني عقد، وكل عقدة تحوي ثلاث درجات حرية (3 انتقالات)، وهو عنصر من نوع (Solid Section)، الشكل (6) .



الشكل (6) تمثيل العنصر C3D8R
(ABAQUS Ver. 6.14 Documentation, 2014)

بينما تم استخدام العنصر T3D2 لنمذجة قضبان التسليح من مركبات BFRP والقضبان الفولاذية لقضيبي التعليق والأساور العرضية في الجوائز، وهو عبارة عن عنصر شبكي فراغي (Truss Element)مؤلف من عقدتين وكل عقدة تحوي ثلاث درجات من الحرية (3 انتقالات)، والشكل (7-a) يبين هذا العنصر مع ترقيم عقدتي البداية والنهاية، والشكل (7-b) يبين نقطة غاوس الوحيدة في المنتصف.



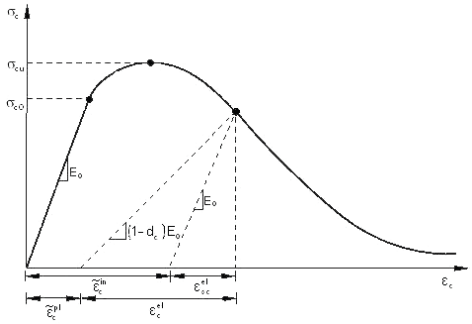
الشكل (7) تمثيل العنصر T3D2
(ABAQUS Ver. 6.14 Documentation, 2014)

3.1.3 توصيف سلوك المواد المستخدمة في النمذجة:

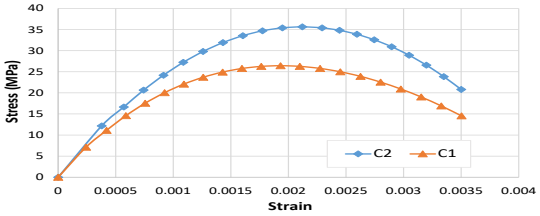
1.3.1.3 الخرسانة:

تم نمذجة سلوك مادة الخرسانة باستخدام طريقة (Concrete Damaged Plasticity) CDP، وهي إحدى الطرق التي يتيحها البرنامج (ABAQUS Ver. 6.14 Documentation, 2014) لتمثيل سلوك مادة الخرسانة على الضغط والشد المحوري، حيث يكون وفق هذه الطريقة سلوك الخرسانة على الضغط المحوري متمايز لثلاث مراحل أساسية كما بالشكل (8)، ففي البداية يكون منحني علاقة (التشوهات النسبية – الاجهاد) خطياً حتى وصول الإجهاد إلى قيمة الإجهاد الابتدائي (Initial Stress) σ_{co}، ليبدأ بعدها السلوك اللاخطي للخرسانة، حيث تستمر الانفعالات بالتزايد مع زيادة الاجهاد المطبق حتى الوصول إلى القيمة الحدية لإجهاد الخرسانة على الضغط (Ultimate stress) σ_{cu}، وتوصف هذه المرحلة بمرحلة التقسية الاجهادية (Stress Hardening)، ليبدأ بعدها استمرار تزايد التشوهات النسبية مع انخفاض الإجهاد، وتسمى هذه المرحلة بـ (Strain Softening) حيث تضعف مقاومة الخرسانة بسبب فقدان الترابط بين مكوناتها.

تم اعتماد منحني العلاقة (التشوه النسبي – الإجهاد) للخرسانة C1 و C2 على الضغط المحوري وفق الكود الأوربي (Eurocode2, 2004)، حيث يمكن اعتبار الخرسانة تنهار عند تشوه نسبي مساوي إلى 3.5 ‰ كما بالشكل (9)، مع أخذ معامل بواسون للخرسانة مساوياً إلى 0.2

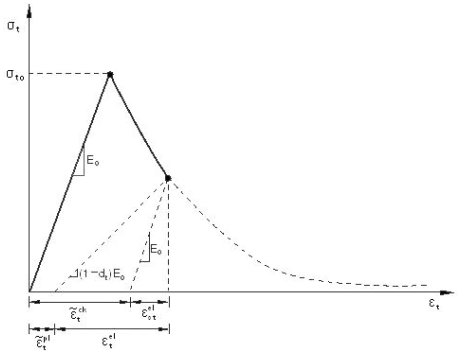


الشكل (8) المنحني العام لعلاقة (التشوه النسبي – الإجهاد) للخرسانة على الضغط المحوري وفق طريقة CDP (ABAQUS Ver. 6.14 Documentation, 2014).



الشكل (9) منحني علاقة (التشوه النسبي – الإجهاد) للخرسانة على الضغط المحوري (الدراسة الحالية) وفق (Eurocode2, 2004).

بينما يكون سلوك الخرسانة على الشد المحوري وفق طريقة CDP كما بالشكل (10).



الشكل (10) المنحني العام لعلاقة (التشوه النسبي – الإجهاد) للخرسانة على الشد المحوري وفق طريقة CDP (ABAQUS Ver. 6.14 Documentation, 2014).

حيث يزداد التشوه النسبي بشكل خطي مع زيادة مستوى الاجهاد الشاد المطبق وصولاً لقيمة الاجهاد σ_{to} الموافق لمقاومة الخرسانة على الشد، لتبدأ بعدها التشققات بالظهور وانخفاض مقاومة الشد للخرسانة مع زيادة التشوهات النسبية الموافقة. تم توصيف سلوك الخرسانة على الشد المحوري وفق العلاقة (1) كما بالشكل (11) (Wang and Hsu, 2001).

العلاقة (1)

$$\left.\begin{aligned}\sigma_t = E_c * \varepsilon_t \quad if \quad \varepsilon_t \le \varepsilon_{cr}\\ \sigma_t = f_{ck} * \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t}\right)^{0.4} \quad if \quad \varepsilon_t > \varepsilon_{cr}\end{aligned}\right\}$$

حيث:

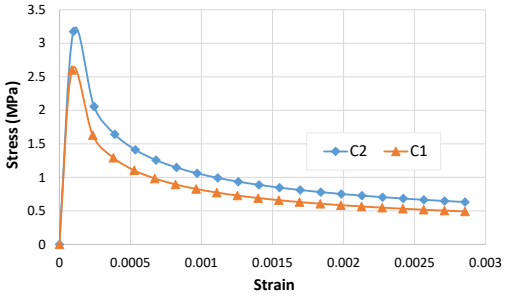
σ_t : اجهاد الشد المحوري المطبق.

E_c : معامل مرونة الخرسانة.

ε_t : التشوه النسبي للخرسانة على الشد.

ε_{cr} : التشوه النسبي للخرسانة الموافق لمقاومة الخرسانة على الشد.

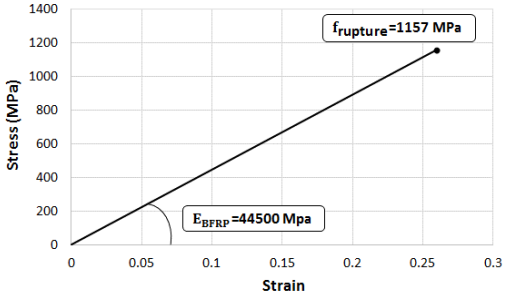
f_{ck} : المقاومة المميزة الاسطوانية للخرسانة على الضغط.



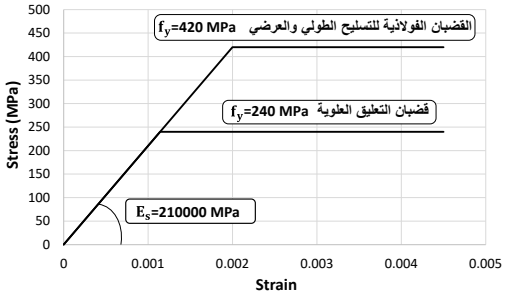
الشكل (11) منحني علاقة (التشوه النسبي – الإجهاد) للخرسانة على الشد المحوري (الدراسة الحالية)

2.3.1.3 قضبان التسليح:

يبين الشكلان (12-a, b) منحني العلاقة (التشوه النسبي - الإجهاد) المميزة لكل من قضبان التسليح من نوع BFRP والقضبان الفولاذية المستخدمة في النمذجة على التوالي، حيث يكون سلوك قضبان BFRP على الشد سلوكاً خطياً مرناً حتى الانقطاع، مع افتراض معامل بواسون لهذه القضبان مساوياً إلى 0.2، بينما تم افتراض سلوك القضبان الفولاذية سلوكاً مرناً لدناً لدونة مثالية (Elastic-Perfectly Plastic)، حيث يكون سلوك القضبان الفولاذية على الشد المحوري خطياً حتى وصول مستوى الاجهاد إلى حد الخضوع (السيلان) f_y (yield stress) الذي يرافقه التشوه النسبي ε_y (yield strain)، لتزداد بعدها التشوهات النسبية الحاصلة مع ثبات قيمة الاجهاد المطبق، وتم افتراض معامل بواسون للقضبان الفولاذية مساوياً 0.3، مع اعتماد الخواص الميكانيكية لقضبان التسليح المستخدمة في النمذجة كما بالجدول (1) الوارد أعلاه.



(a)

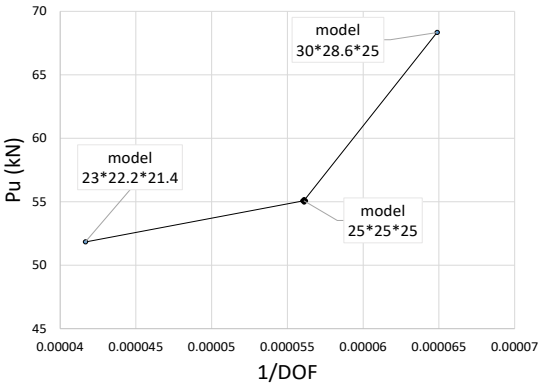


(b)

الشكل (12) مخطط (التشوه النسبي - الإجهاد) لقضبان التسليح المستخدمة في النمذجة العددية. (الدراسة الحالية)

2.3 دراسة أثر تقارب الشبكة (Mesh Convergence):

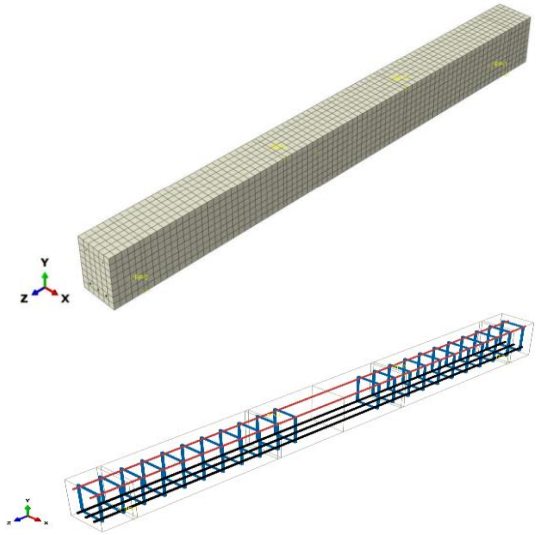
يبين الشكل (13) العلاقة بين قوة الانهيار الكلية P_u مع مقلوب عدد درجات الحرية DOF (Degree of Freedom) في النموذج العددي للجائز BB 3Ø8-C2.



الشكل (13) دراسة أثر تقارب الشبكة للنموذج العددي للجائز BB 3Ø8-C2.

إن زيادة عدد التقسيمات لخطوط الشبكة وفق طريقة العناصر المحدودة يؤدي إلى دقة أكبر في النتائج للعنصر المدروس،

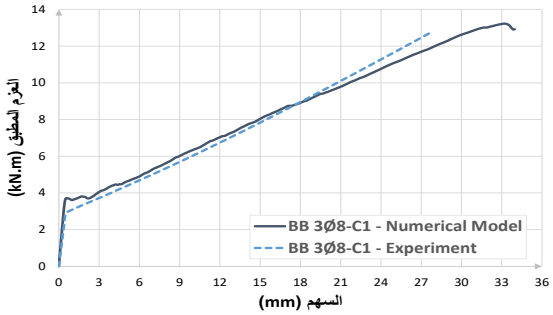
لكن مع زيادة عدد التقسيمات تزداد عدد درجات الحرية في النموذج العددي للعنصر المدروس، مما يتطلب زمن أكبر لإجراء التحليل، ووفق الشكل (13) يمكن ملاحظة حدوث تقارب لقيمة القوة عند الانهيار عند استخدام العنصر الفراغي C3D8R المستخدم لنمذجة مادة الخرسانة بأبعاد (25*25*25 mm) حيث $P_u = 55.1$ kN وعند استخدام نفس العنصر بأبعاد (23*22.2*21.4 mm) حيث $P_u = 51.8$ kN، بينما أدى استخدام نفس العنصر بأبعاد (30*28.6*25 mm) إلى قوة انهيار $P_u = 68.3$ kN ، وبالتالي فإنه يمكن اعتبار العنصر الفراغي C3D8R بأبعاد (25*25*25 mm) كافٍ للحصول على حل دقيق مع تحقيق زمن مقبول لإجراء التحليل. الشكل (14) يبين النموذج العددي للجائز BB 3Ø8-C2 وفق الأبعاد (25*25*25 mm) للعنصر C3D8R وتموضع التسليح الطولي والعرضي ضمن الجائز في برنامج ABAQUS.



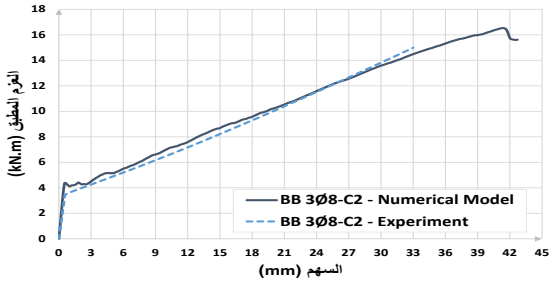
الشكل (14) النموذج النهائي للجائز BB 3Ø8-C2 وفق التقسيمات النهائية للعنصر C3D8R. (ABAQUS 6.14)

3.3 المقارنة بين النتائج التحليلية للنماذج العددية والتجريبية للجوائز المختبرة:

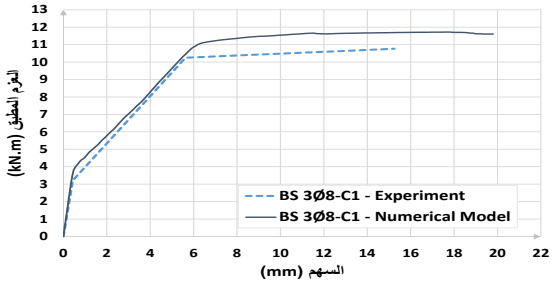
تبين الاشكال (15-a, b, c) مقارنة المنحنيات المميزة لعلاقة (السهم وسط المجاز – العزم المطبق) بين الدراسة العددية والتجريبية للجوائز (BB 3Ø8-C1)، (BB 3Ø8-C2) و (BS 3Ø8-C1) على التوالي.



(a)



(b)



(c)

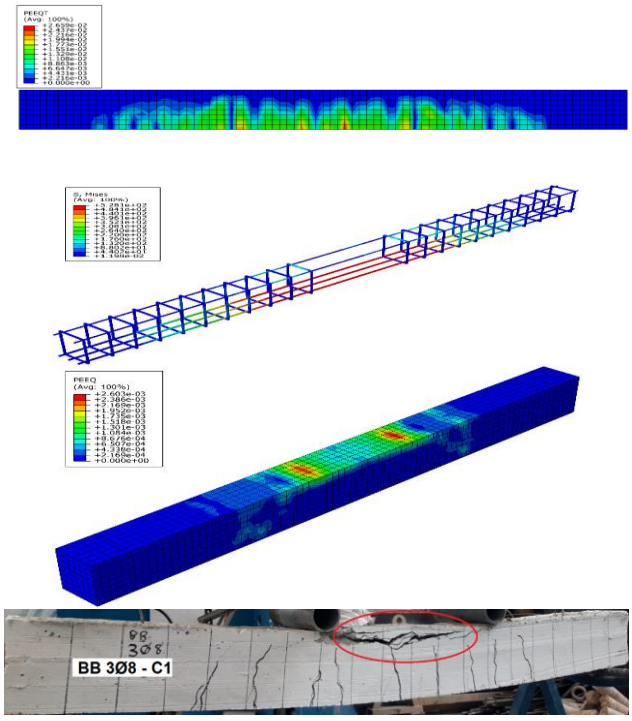
الشكل (15) مقارنة منحني علاقة (السهم وسط المجاز – العزم المطبق) بين الدراسة العددية والتجريبية للجوائز المختبرة.

كان التوافق جيد بين المنحنيات المميزة لعلاقة (السهم وسط المجاز – العزم المطبق) بين النماذج العددية والمخبرية للجوائز المدروسة خلال مراحل التحميل المختلفة، مع ملاحظة كون النماذج العددية للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP انهارت عند قيم أعلى للعزم المطبق من الجوائز المختبرة بنسب

تراوحت من 4% للجائز (BB 3Ø8-C1) حتى 9% للجائز (BB 3Ø8-C2)، فيما كانت قيمة العزم الموافق لبداية تجاوز الاجهاد الشاد حد السيلان في القضبان الفولاذية في النموذج العددي للجائز (BS 3Ø8-C1) أعلى منها في الجائز المختبر بنسبة 8%، والأشكال (16-a, b, c) تبين مقارنة بين النموذج العددي والتجريبي عند الانهيار للجائز (BB 3Ø8-C1)، وتوزع التشوهات النسبية اللدنة في المناطق المشدودة والمضغوطة في الخرسانة والاجهاد الحاصل في قضبان التسليح على التوالي في النموذجين العددي والتجريبي.

4.3. الدراسة البارامترية:

تم إنشاء نماذج عددية لعدد من الجوائز بأبعاد وتسليح عرضي مشابه للجوائز المختبرة مع تغيير نسبة التسليح الرئيسي السفلي لقضبان BFRP وفق الجدول (3)، واستخدام المقاومة المميزة للخرسانة على الضغط 26.42 MPa لجميع النماذج.



الشكل (16) مقارنة توزع التشوهات اللدنة لمناطق الشد والضغط على طول الجائز بين النموذج العددي والتجريبي عند الانهيار للجائز

الجدول (3) النماذج العددية للجوائز ونسب تسليحها.

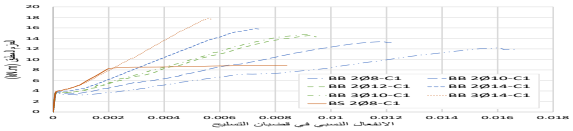
الجائز	نسبة التسليح ρ_f	ACI 440.1R (2015) نسبة التسليح التوازنية ρ_{fb}	ACI 440.1R (2015) ρ_f/ρ_{fb}	$E_f * A_f$ (kN)
BB 2Ø8-C1	0.0041	0.0017	2.39	4474
BB 2Ø10-C1	0.0063	0.0017	3.73	6990
BB 2Ø12-C1	0.0091	0.0017	5.38	10066
BB 2Ø14-C1	0.0124	0.0017	7.32	13700
BB 3Ø10-C1	0.0095	0.0017	5.60	10485
BB 3Ø14-C1	0.0187	0.0017	10.98	20551
BS 2Ø8-C1	0.0041	0.0273	0.15	21112

1.4.3 التشوهات النسبية في قضبان التسليح والخرسانة:

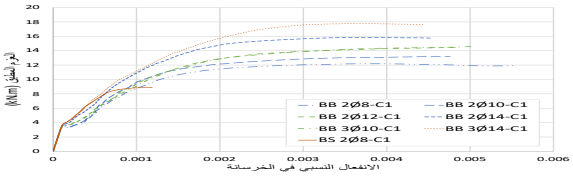
يبين الشكلان (17-a, b) منحني العلاقة (الانفعال النسبي – العزم المطبق) لقضبان التسليح السفلية المشدودة والخرسانة المضغوطة على الوجه العلوي للجوائز بمنتصف BB 3Ø8-C1، (ABAQUS 6.14)، (الدراسة الحالية). المجاز على التوالي في النماذج العددية للجوائز المدروسة.

يمكن ملاحظة التقارب في منحنيات العلاقة المميزة (الانفعال النسبي – العزم المطبق) لقضبان BFRP وفق الشكل (17-a) في مرحلة ما قبل التشقق لجميع الجوائز المدروسة، حيث تكون الخرسانة أسفل الجائز لازالت تعمل على مقاومة الاجهادات الشادة في حين تكون مساهمة قضبان التسليح قليلة في مقاومة هذه الاجهادات مقارنة بالخرسانة، أما في المرحلة المرحلة التي تلت مرحلة التشقق والتي تترافق مع تجاوز الاجهاد الشاد لأقصى ليف خرساني في المنطقة المشدودة حد مقاومة الخرسانة على الشد فتخرج الخرسانة في المنطقة المشدودة عندها عن مقاومة الاجهادات الشادة ويحدث التشقق لتتحمل قضبان BFRP هذه الاجهادات ويظهر التباين في منحنيات العلاقة المميزة (الانفعال النسبي – العزم المطبق) لقضبان BFRP، حيث أخذت التشوهات النسبية لقضبان BFRP بالزيادة حتى وصول الانفعالات النسبية في الخرسانة المضغوطة إلى القيمة الحدية الموافقة لانهيار الخرسانة على الضغط والمساوي إلى 0.0035 ليخرج عندها الجائز عن العمل، أما بالنسبة للجائز (BS 2Ø8-C1) و المسلح

بالقضبان الفولاذية فإن السلوك المميز لعلاقة الانفعال النسبي لقضبان التسليح الفولاذية مع العزم المطبق يتضمن ثلاث مراحل متمايزة، وهي مرحلة ما قبل التشقق وبعده ومرحلة الانفعالات الحاصلة عند وصول الاجهاد في القضبان الفولاذية إلى عتبة أو حد السيلان المميز للقضبان الفولاذية، حيث تزداد عندها التشوهات النسبية اللدنة في القضبان الفولاذية مع ثبات العزم المطبق.



(a)



(b)

الشكل (17) منحني العلاقة (التشوهات النسبية –العزم المطبق) لقضبان التسليح والخرسانة في النماذج العددية للجوائز المدروسة.

ساهمت زيادة نسبة التسليح المتوافرة ضمن المقطع العرضي للجوائز المسلحة بقضبان BFRP في انخفاض التشوهات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح في المرحلة التي تلت مرحلة التشقق وصولاً للانهيار كما بالشكل (17-a)، كما أنه من الملاحظ أيضاً وفق الشكلان (17-a, b) تقارب قيم التشوهات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح والخرسانة للجوائز المسلحة بقضبان BFRP والتي لها نسب تسليح متقاربة كالجائزين (BB 2Ø12-C1) و (BB 3Ø10-C1)، في حين أنه و بالمقارنة بين الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP والمسلحة بالقضبان الفولاذية والتي لها نسب تسليح متساوية كما للجائزين (BB 2Ø8-C1) و (BS 2Ø8-C1) على التوالي، فإن التشوهات النسبية الحاصلة في قضبان BFRP كانت أكبر بحوالي 4.5 أضعاف عند سوية متساوية من العزم المطبق موافقة لإجهادات شادة في القضبان الفولاذية مساوية إلى حد السيلان والموافق لتشوه نسبي 2 ‰ في القضبان الفولاذية، وذلك بسبب انخفاض معامل المرونة الخاص بقضبان BFRP بحوالي 4.7 ضعف عنه في القضبان الفولاذية.

من ناحية أخرى يمكن ملاحظة أثر نسبة التسليح على استقرار المنحني المميز لعلاقة (الانفعال النسبي – العزم المطبق) وفق الشكلان (17-a, b) فور حدوث التشقق ضمن المقطع العرضي للجوائز المدروسة والمسلحة بقضبان BFRP، حيث ساهمت زيادة نسبة التسليح في التخفيف من حدة الزيادة المفاجئة في الانفعالات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح المشدودة والخرسانة المضغوطة عند الوجه العلوي للجائز فور حدوث التشقق بسبب تغير عطالة المقطع العرضي للجائز، كذلك الأمر فإن الاستقرار كان أفضل في منحني العلاقة المميز (الانفعال النسبي – العزم المطبق) فور حدوث التشقق للجائز (BS 2Ø8-C1) والمسلح بالقضبان الفولاذية مقارنة بالجائز (BB 2Ø8-C1) والمسلح بنفس نسبة التسليح من قضبان BFRP، وذلك بسبب معامل المرونة الكبير نسبياً الذي يميز القضبان الفولاذية مقارنة بقضبان BFRP.

الجدول (4) يبين قيم التشوهات النسبية الحاصلة في مستوى مقبول ومتحفظ لجانب الأمان كمستوى للأحمال الخدمية

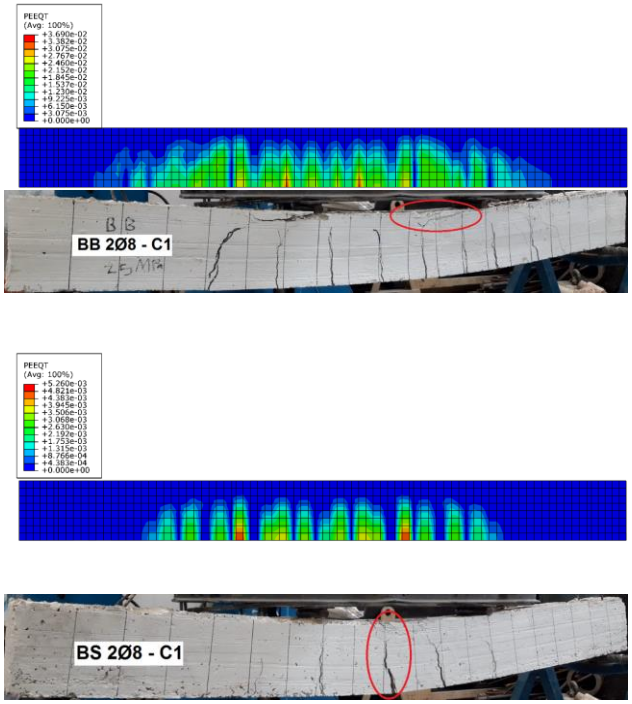
الجدول (4) قيم الانفعال النسبي في قضبان التسليح والخرسانة عند سويات تحميل مختلفة للنماذج العددية للجوائز المدروسة.

$\varepsilon_{Concrete}(‰)$			$\varepsilon_{Rebar}(‰)$			الجائز
M_n	$0.75M_n$	$0.3M_n$	M_n	$0.75M_n$	$0.3M_n$	
3.5	1.090	0.249	15.98	10.87	1.91	BB 2Ø8-C1
3.5	1.100	0.333	11.82	7.65	1.44	BB 2Ø10-C1
3.5	1.324	0.340	9.29	5.93	1.31	BB 2Ø12-C1
3.5	1.380	0.356	7.28	4.844	1.29	BB 2Ø14-C1
3.5	1.343	0.342	9.09	5.67	1.30	BB 3Ø10-C1
3.5	1.378	0.368	5.60	3.92	1.06	BB 3Ø14-C1
0.677	0.434	0.073	2.00	1.31	0.05	BS 2Ø8-C1

قضبان التسليح والخرسانة المضغوطة عند سويات تحميل مختلفة للنماذج العددية المدروسة.

تراوحت قيم الانفعال الحاصل في قضبان BFRP للجوائز العددية المدروسة عند الانهيار وفق الجدول (4) من حوالي 5.6 ‰ حتى 16 ‰ بينما الانفعال الموافق لإجهاد الانقطاع 26 ‰، أما عند مستوى موافق 30% من العزم المقاوم عند الانهيار للجوائز المدروسة تراوحت الانفعالات الحاصلة من 1.06 ‰ حتى 1.91 ‰، وفي هذا السياق وبحسب الكود الكندي ISIS (2007) فإن السوية الموافقة للأحمال الخدمية التي يمكن يتعرض لها الجائز خلال مرحلة الاستثمار هي السوية الموافقة لانفعال 2 ‰ وذلك لاعتبارات متعلقة بعرض الشقوق المسموح بها، في حين أنه وبحسب(Mota et al., 2006)، (Bischoff et al., 2009) و (El-Nemr et al., 2013) فإنه يمكن اعتبار سوية الحمل الموافقة 30% من العزم المقاوم عند الانهيار هي السوية الموافقة للأحمال الخدمية، وعليه وبحسب الجدول (4) فإنه يمكن اعتبار مستوى الحمل الموافق 30% من العزم المقاوم عند الانهيار للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP التي يمكن يتعرض لها الجائز خلال مرحلة الاستثمار عند وجوده ضمن الهيكل الإنشائي لمنشأ حقيقي.

أبدت النماذج العددية للجوائز المسلحة بقضبان BFRP تشققات أكثر في المناطق المشدودة من الجوائز المسلحة بنفس نسب التسليح من القضبان الفولاذية، يتفق ذلك مع النتائج التجريبية للجوائز المختبرة كما بالشكل (18-a, b)، والذي يبين مقارنة توزع التشوهات النسبية المكافئة للمناطق المشدودة على طول الجائز في النماذج العددية مع التشققات الحاصلة في النماذج التجريبية عند الانهيار للجوائز BB 2Ø8-C1 و BS 2Ø8-C1 على التوالي.



الشكل(18) مقارنة توزع التشوهات اللدنة لمناطق الشد بين النماذج العددية والتجريبية للجائزين BB 2Ø8-C1 و BS 2Ø8-C1.

حيث بدأت التشـــققات بالظهور في النماذج التجريبية للجوائز المختبرة في منطقة العزم الثابت بين نقطتي التحميل وبشـــكل عامودي على محور الجائز ابتداء من الوجه الســـفلي للجائز بمنطقة الشـــد باتجاه منطقة الضـــغط أعلى الجائز، ومع زيادة مســـتوى التحميل ظهرت شـــقوق إضـــافية خارج منطقة العزم الثابت بين نقطتي التحميل باتجاه المساند في الجوائز المسلحة بقضبان BFRP، وكانت هذه الشقوق تميل عن المحور الأفقي للجائز بسـبب تراكب الاجهادات، وعند وصـول العزم المطبق إلى قيمة تساوي قدرة تحمل الجائز ظهرت شقوق "تصدعات" أفقية مفاجئة عند السطح العلوي للجائز في المنطقة المضغوطة بين نقطتي التحميل، لينهار الجائز بتحطم الخرسانة عند الوجه العلوي ويخرج الجائز عن العمل، أما بالنسبة للجوائز المسلحة بالقضـبان الفولاذية فإن الانهيار حدث بتوسـع تدريجي لشـق الانعطاف الرئيسي وسط المجاز ووصوله إلى منطقة الضغط أعلى الجائز بالتزامن مع تجاوز اجهادات الشـد في القضـبان الفولاذية عتبة السيلان.

يبين الجدول (5) قيم العزم المقاوم عند الانهيار للنماذج العددية للجوائز المدروسة والمسلحة بقضبان BFRP ومقارنتها مع القيم التحليلية وفق عدد من الكودات الخاصـة بحسـاب وتصـميم الخرسانة المسلحة بقضبان من مركبات FRP.

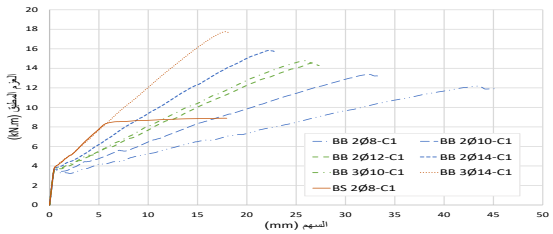
الجدول (5) مقارنة قيم العزم عند الانهيار بين الدراسة الدراسة العددية للجوائز والقيم التحليلية.

$\frac{M_{FEM.}}{M_{Pre.}}$			نتائج الدراسة العددية العزم المقاوم الاسمي $M_n\ (kN.m)$		الجائز
ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018)	CEB – FIB (2007)	ACI 440.1R (2015)	نمط الانهيار	M_n	
1.05	1.20	1.08	منضغط	12.18	BB 2Ø8 – C1
0.95	1.10	0.98	منضغط	13.36	BB 2Ø10 – C1
0.91	1.05	0.93	منضغط	14.56	BB 2Ø12 – C1
0.89	1.02	0.89	منضغط	15.84	BB 2Ø14 – C1
0.91	1.05	0.92	منضغط	14.78	BB 3Ø10 – C1
0.88	1.00	0.87	منضغط	17.75	BB 3Ø14 – C1
0.93	1.07	0.95	المتوسط		
0.06	0.07	0.08	الانحراف المعياري		

كان التوافق جيد بين متوســـط العزم المقاوم عند الانهيار في النماذج العددية للجوائز المدروسة والقيم التحليلية بفروقات 5% وفق ACI 440.1R (2015) و7% وفق CEB-FIP (2007) وملحق الكود العربي الســـوري رقم 18 (2018).

2.4.3 السهم:

يبين الشـكل (19) السـهم (الانحراف) بمنتصـف المجاز مقابل العزم المطبق في النماذج العددية للجوائز المدروســـة. يمكن ملاحظة التصرف المتقارب للجوائز حتى سويات الحمل المسببة للتشقق، مما يدل على التأثير القليل لنسبة التسليح على صلابة المقطع غير المتشـــقق، فيما يظهر التباين في منحني العلاقة (الســـهم –العزم المطبق) في مرحلة ما بعد التشـــقق حتى الانهيار.



الشكل (19) منحني العلاقة (السهم–العزم المطبق) في النماذج العددية للجوائز المدروسة.

يمكن تقسيم سلوك السهم في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP والخاضعة لعزم انحناء "انعطاف" إلى مرحلتين متباينتين، قبل التشقق وبعده، ففي المرحلة الأولى والتي يكون فيها المقطع العرضي غير متشقق فإن سلوك العنصر الخرساني يحكمه I_g (عزم العطالة الكلي)، أما المرحلة الثانية حيث يكون العزم المطبق M_a أكبرمن عزم التشقق M_{cr} فيصبح سلوك الجائز الخرساني يحكمه I_e (عزم العطالة الفعال)، حيث تنخفض صلابة المقطع العرضي للجائز بسبب التشقق الحاصل، بينما يكون سلوك الجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية متضمن مرحلة ثالثة وهي المرحلة الموافقة لوصول الاجهاد في القضبان الفولاذية حد السيلان، حيث تزداد قيمة السهم الحاصل مع ثبات العزم المطبق كما في المنحني المميز للجائز (BS 2Ø8 – C1). ساهمت زيادة نسبة التسليح بشكل ملحوظ في انخفاض قيمة السهم المتشكل وسط المجاز للجوائز العددية المدروسة والمسلحة بقضبان BFRP في المرحلة التي تلت التشقق حتى انهيار الجوائز، فيما كان السلوك (السهم – العزم المطبق) متقارب للجوائز ذات نسب التسلح المتقاربة كما هو الحال في الجائزين (BB 2Ø12 – C1) و (BB 3Ø10 – C1)، من ناحية أخرى وبالمقارنة بين الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP والجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية والتي لها نفس نسبة تسليح، فإن الجوائز المسلحة بقضبان BFRP أبدت سهوم أكبر في مرحلة مابعد التشقق، فعند مستوى الحمل الموافق لبداية تجاوز الاجهاد في القضبان الفولاذية إجهاد السيلان في الجائز (BS 2Ø8 – C1) كانت قيمة السهم الحاصل في الجائز (BB 2Ø8 – C1) والمسلح بقضبان BFRP أكبر بحوالي 4 أضعاف كما بالشكل (19)، مما يدل على انخفاض صلابة المقطع العرضي المتشقق للجائز (BB 2Ø8 – C1) بسبب انخفاض معامل المرونة الخاص بقضبان BFRP مقارنة بمعامل المرونة الخاص بقضبان التسليح الفولاذية.

كما أنه من الملاحظ أيضاً تحسن استقرار المنحني المميز لعلاقة (السهم – العزم المطبق) فور حدوث التشقق مع زيادة نسبة التسليح المتوافرة ضمن المقطع العرضي للجوائز المسلحة بقضبان BFRP، كذلك كان الأمر مع الجائز (BS 2Ø8 – C1) والمسلح بالقضبان الفولاذية ذات معامل المرونة الكبير نسبياً مقارنة بمعامل مرونة قضبان BFRP، حيث تسهم زيادة الصلابة المحورية للتسليح والمتمثلة بالجداء بين معامل مرونة ومساحة التسليح $(E.A)$ في التخفيف من حدة الزيادة المفاجئة للسهم الحاصل فور حدوث التشقق وانخفاض صلابة المقطع العرضي للجائز عندها.

الجدول (6) يبين قيم السهم المتشكل وسط المجاز للجوائز العددية المدروسة وذلك عند سويات تحميل مختلفة وعند قيمة موافقة لتشوه نسبي مقداره ‰ 2 في قضبان BFRP.

الجدول (6) قيم السهم وسط المجاز عند سويات تحميل مختلفة للنماذج العددية المدروسة.

الجائز	السهم وسط المجاز $\delta\ (mm)$			
	$0.3M_n$	$\varepsilon_{Rebar} = 0.002$	$0.75M_n$	M_n
BB 2Ø8–C1	3.33	3.42	27.63	43.33
BB 2Ø10–C1	2.77	3.43	20.61	32.38
BB 2Ø12–C1	2.63	4.22	17.02	26.71
BB 2Ø14–C1	2.74	4.98	14.06	22.23
BB 3Ø10–C1	2.66	4.4	16.31	25.92
BB 3Ø14–C1	2.43	5.20	11.45	17.85
BS 2Ø8–C1	0.29	5.65	3.29	5.65

بحسب الكود الأمريكي ACI 440.1R (2015) والكود العربي السوري (2012) فإن قيمة السهم لجائز بسيط الاستناد تحت تأثير الحمولات الخدمية يجب ألا تتجاوز القيمة (180/المجاز) أي $10\ mm$ للجوائز العددية المدوسة (حالة السطوح الأخيرة غير المرتبطة بعناصر غير إنشائية يمكن أن تتأثر بالسهم الكبير)، و عليه فإن الجوائز العددية المدروسة محققة لاعتبار السهم المسموح به سواءً أذا ما تم اعتبار مستوى الحمل الخدمي موافق 30% من العزم المقاوم النهائي عند الانهيار أو عند مستوى حمل موافق لانفعال ‰ 2 في قضبان BFRP بحسب ISIS (2007)، مع ملاحظة القيم المتحفظة للسهم عند مستوى الحمل الموافق 30% من العزم المقاوم النهائي عند الانهيار للجوائز المدروسة كما بالجدول (6).

4. الاستنتاجات والتوصيات:

1.4 الاستنتاجات:

1. كان التوافق جيد بين نتائج الدراسة العددية وفق طريقة العناصر المحدودة والنتائج التجريبية للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP، بفروقات تراوحت ما بين 4% و9% لقيم العزم المقاوم عند الانهيار.
2. كذلك فإن التوافق كان جيداً بين متوسط العزم المقاوم عند الانهيار للنماذج العددية المدروسة والقيم التحليلية بفروقات 5% وفق(2015) ACI 440.1R و7% وفق CEB-FIP (2007) وملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018).
3. كان تأثير نسبة التسليح قليل نسبياً في مرحلة ما قبل التشقق على قيم التشوهات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح والخرسانة والسهم في النماذج العددية للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP.
4. بينما ساهمت زيادة نسبة التسليح بشكل ملحوظ في انخفاض قيم التشوهات النسبية في قضبان التسليح والسهم المتشكل في المرحلة التي تلت مرحلة التشقق وصولاً للانهيار في النماذج العددية للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP.
5. كان السلوك متقارب من حيث التشوهات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح والخرسانة والسهم المتشكل وسط المجاز في النماذج العددية للجوائز المدروسة وذات نسب التسليح المتقاربة.
6. ساهمت زيادة نسبة التسليح في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP في تخفيض حدة الزيادة المفاجئة للتشوهات النسبية الحصالة في قضبان التسليح والخرسانة المضغوطة المقابلة وكذلك السهم المتشكل وسط المجاز فور حدوث التشقق وانخفاض صلابة المقطع العرضي للجائز.
7. كذلك فإن أداء القضبان الفولاذية كان أفضل من قضبان BFRP في استقرار المنحني المميز للتشوهات النسبية الحاصلة في قضبان التسليح والخرسانة المضغوطة المقابلة والسهم المتشكل وسط المجاز فور حدوث التشقق في النماذج العددية للجوائز المدروسة، وذلك نظراً لمعامل المرونة الكبير نسبياً الذي يميز القضبان الفولاذية مقارنة بمعامل مرونة قضبان BFRP.
8. كان تأثير انخفاض معامل المرونة الخاص بقضبان BFRP مقارنة بالقضبان الفولاذية سلبياً من حيث زيادة قيم التشوهات النسبية الحاصلة في قضبان BFRP والخرسانة المضغوطة المقابلة وقيم السهم المتشكل وسط المجاز في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP في مرحلة ما بعد التشقق.
9. تعد سوية الحمل الموافقة 30% من العزم المقاوم عند الانهيار للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP كسوية حمل متحفظة ولصالح الأمان إذا ما تم اعتبارها كسوية للأحمال الخدمية التي يمكن أن يتعرض لها الجائز خلال مرحلة الاستثمار.

2.4 التوصيات:

1. الدراسة العددية لتأثير بارامترات أخرى كالمقاومة المميزة للخرسانة على الضغط وشكل القوة المطبقة على سلوك الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP.
2. دراسة السلوك طويل الأمد للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP تحت تأثير الحمولات الدائمة.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

References:

1. الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة (2012)، الطبعة الرابعة، دمشق.
2. الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت، القضبان البوليميرية المسلحة بالألياف (2018)، الملحق 18، منشورات نقابة المهندسين، سوريا.
3. ABAQUS (2014), version 6.14-4. Dassault Systemes Simulia Corp., USA.
4. ACI Committee 440 (2015). "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-15)." ACI, Farmington Hills, Michigan, USA.
5. Ahmad, S. (2003). "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review." Cement and Concrete Composites, 25(4–5), 459–471.
6. ASTM D3171 (2011). "Standard Test Method for Constituent Content of Composite Materials." American Society for Testing and Material, Conshohocken, USA, 11 pp.
7. Bischoff, P., Gross, S., and Ospina, C. (2009). "The Story behind Proposed Changes to the ACI 440 Deflection Requirements for FRP-Reinforced Concrete." ACI Special Publication, SP-264, 53–76.
8. BS EN 1992-1 (2004), "Eurocode2, Design of Concrete Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings", European committee for standardization CEN.
9. CARTER, J., & GENIKOMSOU, A. S. (2019). "Investigation on modeling parameters of concrete beams reinforced with basalt FRP bars." Frontiers of Structural and Civil Engineering, 13(6), 1520-1530.
10. CEB-FIP. (2007), "Fib Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures". The International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland.
11. CEB-FIP. (2010), "Fib Bulletin 55: Model Code 2010, First complete draft – Volume 1". The International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland.
12. Chowdhury, I. R., Pemberton, R., & Summerscales, J. (2022). "Developments and industrial applications of basalt fibre reinforced composite materials." Journal of Composites Science, 6(12), 367.
13. Demir, A., Ozturk, H., & Dok, G. (2016). "3D Numerical Modeling of RC Deep Beam Behavior by Nonlinear Finite Element Analysis." Disaster Science and Engineering, 2(1), 13-18.
14. Elgabbas, F., Vincent, P., Ahmed, E. A., & Benmokrane, B. (2016). "Experimental Testing of Basalt-Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete Beams." Journal of Composite: Part B, 91, 205-218.
15. El-Nemr, A., Ahmed, E. A, and Benmokrane, B. (2013). "Flexural Behavior and Serviceability of Normal- and High-Strength Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars." ACI Structural Journal, 110 (6), 1077–1088.
16. InfoMine Research Group. (2007). "Basalt Fiber-Based Thermal Insulating Materials Market Research in Russia." Moscow.
17. ISIS Canada (2007). "Reinforcing Concrete Structures with Fiber-Reinforced Polymers (Design Manual No. 3)." Manitoba, Canada.
18. Lapko, A., and Urbański, M. (2015). "Experimental and Theoretical Analysis of Deflections of Concrete Beams Reinforced with Basalt Rebar." Journal of Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15 (1), 223–230.
19. Mota, C., Alminar, S., and Svecova, D. (2006). "Critical Review of Deflection Formulas for FRP RC Members." ASCE Journal of Composites for Construction, 3 (10), 183–194.
20. Nanni, A. (1993), "Flexural Behavior and Design of RC Members using FRP Reinforcement." ASCE Journal of Structural Engineering, 119 (11), 3344–3359.
21. Obaidat T.Y., (2011). "Structural Retrofitting Of Concrete Beams Using FRP - Debonding Issues.", PhD. Thesis, Department of Construction Sciences, Division of Structural Mechanics, Lund University, Sweden.
22. Pawłowskia, D., & Szumigałaa, M. (2015). "Flexural behaviour of full-scale basalt FRP RC beams–experimental and numerical studies." Procedia Engineering, 108, 518-525.
23. Salih, R., & Zhou, F. Y. (2019). "Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

beam reinforced with FRP bars." Civil Engineering Journal, 5(11), 2296-2308.

24. Wang, T., & Hsu, T. T. (2001). "Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models." Computers & structures, 79(32), 2781-2791.

25. Wu, Z., Wang, X., and Wu, G. (2012). "Advancement of Structural Safety and Sustainability with Basalt Fiber Reinforced Polymers." Proceedings of 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE), Rome, Italy, 29 pp.

26. Wu, Z., Wang, X., Iwashita, K. (2007). "State-of-the-Art of Advanced FRP Applications in Civil Infrastructure in Japan." Journal of Composites & Polycon, American Composites Manufacturers Association, Tampa, FL USA.