

حسن أنور العطار^{1*} طلال شرف² هشام المما³

^{1*}. طالب دكتراه، قسم الهندسة الإنسانية، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق.

en.hasanalattar1989@damascusuniversity.edu.sy

². أستاذ دكتور، قسم الهندسة الإنسانية، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق.

D.talalsharaf@damascusuniversityy.edu.sy

³. دكتور مدرس، كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق، قسم الهندسة الإنسانية.

hishammamma@dmascusuniversity.edu.sy

الملخص:

إن المزايا الحميدة والمثبتة حتى الآن للقضبان البوليمرية المسلحة بالألياف البازلتية BFRP من حيث الخصائص الميكانيكية والجانب الاقتصادي المتعلق بوفرة المادة الأولية (الصخور البازلتية) اللازمة لإنتاج المكون الرئيسي لهذه القضبان وهي الألياف البازلتية يجعل من هذه القضبان بديلاً واعداً لقضبان التسلیح الأخرى من مركبات FRP، ولكن مع ظهور هذه القضبان حديثاً وعدم اكمال الدراسات المتعلقة بدراسة العناصر الإنسانية من الخرسانية المسلحة بها فإن هذه القضبان ماتزال غير مدرجة في الكودات العالمية الخاصة بالخرسانة المسلحة بقضبان FRP. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد مدى ملائمة استخدام الصيغ الحسابية التي توفرها بعض الكودات العالمية مثل (ACI 440.1R، CEB-FIP 2007) (CEB-FIP 2015) وملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018) لقيم العزم المقاوم والسهمن في الجوازات الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP، وذلك بإجراء مقارنة بين النتائج التحليلية والتجريبية للجوازات المختبرة في هذه الدراسة، والتي تهدف أيضاً إلى تحديد تأثير نسبة التسلیح والمقاومة المميزة للخرسانة على الضغط على قيم العزم المقاوم والسهمن في هذه الجوازات.

يتضمن العمل التجاري اختبار ستة جوازات خرسانية مسلحة بسيطة الاستناد تحت تأثير قوتين مركزيتين، أربعة من هذه الجوازات مسلحة بقضبان BFRP وجائزتان مسلحتان بالقضبان الفولاذية كجوازات مرجعية. خلصت النتائج إلى وجود توافق جيد بفروقات لم تتجاوز 12% بين القيم التحليلية والتجريبية لعزم التشغق والعزم المقاوم النهائي، بينما ظهر تباين مهم وملحوظ بين القيم التحليلية والتجريبية للسهمن عند سويات التحميل المنخفضة، في حين كان التوافق جيداً عند سويات التحميل المرتفعة مع قيمة متحفظة ولصالح الأمان بنسبة معقولة بلغت 17% وفق ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018)، كما بينت النتائج التأثير الكبير لنسبة التسلیح مقارنة بتأثير المقاومة المميزة للخرسانة على الضغط على التشغق على قيمة السهمن الحاصل، ودور معامل المرونة المنخفض نسبياً والخاص بقضبان BFRP في زيادة قيمة السهمن المتشكل في مرحلة ما بعد التشغق.

الكلمات المفتاحية: الخصائص الميكانيكية، قضبان BFRP، تحليلي، تجاري، العزم المقاوم، السهمن، الجوازات الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP.

تاريخ الإيداع: 13/4/2023

تاريخ القبول: 2/8/2023



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

Experimental and Analytical Study of Flexural Capacity and Deflections of Concrete Beams Reinforced with BFRP Bars

Hasan Anoar Al attar^{*1} Talal Sharaf² Hisham Al mamma³

^{*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@damascusuniversityy.edu.sy

³. Teacher at the Department of Structural Engineering _ Faculty of Civil Engineering _ Damascus University. hishammamma@dmascusuniversity.edu.sy

Abstrac:

The good and proven advantages yet of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars, in terms of mechanical properties and economic benefits due to the abundance of raw material (basalt rocks) required for the production of basalt fibers, which is the main component of these bars, make them a promising alternative to other reinforcing bars of FRP compounds. However, due the recent emergence of these bars and the incompleteness of studies related to the study of the concrete structural elements reinforced with these bars, they are still not included in the international codes governing the use of FRP bars in concrete structures. This study aims to determine the suitability of using the computational formulas for the values of flexural capacity and deflection provided by some international codes such as CEB-FIP (2007), ACI 440.1R (2015) and the Syrian Arab Code Appendix No. 18 (2018) in concrete beams reinforced with BFRP bars. This is done by comparing the analytical and experimental values of the beams tested in this study, which also aims to determine the effect of the reinforcement ratio and the characteristic strength of concrete on the pressure on the flexural capacity and the deflection of these beams. The experimental work includes testing six simple supported reinforced beams subjected to two concentrated forces, four of these beams are reinforced with BFRP bars and two beams are reinforced with steel bars as reference beams. The results showed a good agreement between the analytical and experimental values of the cracking moment and the flexural capacity of the concrete beams reinforced with BFRP bars with differences that did not exceed 12%, while a significant difference appeared between the analytical and experimental values of the deflection at low loading levels, while the agreement was good at high loading levels with a reasonable conservative value of 17% in favor of safety according to the Syrian Arab Code Appendix No. 18 (2018). Furthermore, the results showed the substantial influence of the reinforcement ratio compared to the impact of the characteristic strength of concrete on the pressure on the value of the deflection, and the role of the relatively low modulus of elasticity of BFRP bars in increasing the value of the deflection in the post-cracking stage.

Keywords: Mechanical properties, BFRP Bars, Analytical, Experimental, Flexural Capacity, Deflection, Concrete Beams Reinforced with BFRP Bars.

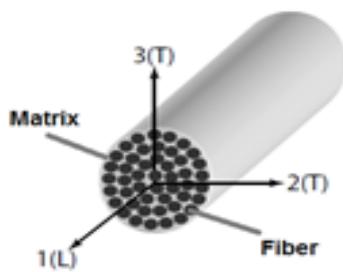
Received: 13/4/2023
Accepted: 2/8/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a

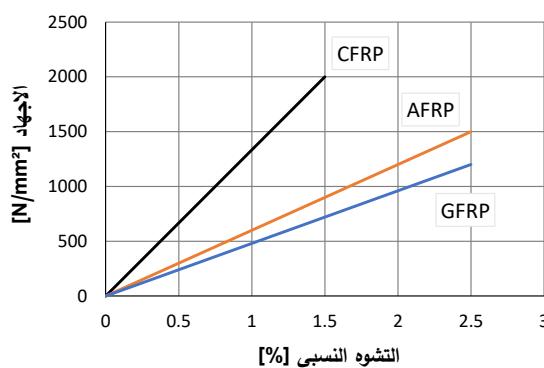
CC BY- NC-SA

المقدمة:



الشكل (1) مكونات المواد المركبة للبوليمرات المسلحة بالألياف FRP.
(CEB-FIP, 2007, 16)

تتميز مركبات FRP على الشد المحوري بالسلوك الخطى المرن حتى الانقطاع، مع عدم وجود المرحلة اللدنة التي يتميز بها فولاذ التسليح التقليدى، والشكل (2) يبين مخطط (التشوه النسبي - الإجهاد) للأنواع الشائعة من مركبات FRP، حيث AFRP تمثل البوليمرات المسلحة بالألياف الزجاجية، GFRP البوليمرات المسلحة بالألياف الأراميدية و CFRP البوليمرات المسلحة بالألياف الكربونية.



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

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 الفلسفه الخاصة بتصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان من مركبات FRP على جعل الانهيار يحدث في منطقة الخرسانة المضغوطة (انهيار هش)، وذلك عكس الفلسفه الخاصة بتصميم الجوائز الخرسانية

يلقى استخدام القضبان من مركبات FRP (البوليمرات المسلحة بالألياف) كتسليح في أعمال التشيد باستخدام الخرسانة المسلحة انتشاراً أوسع مع الوقت نظراً للمزايا الإيجابية التي توفرها هذه القضبان مقارنة بقضبان التسليح الفولاذية التقليدية، كالمقاومة العالية للتآكل بفعل العوامل البيئية المختلفة وخاصة في بعض البيئات ذات الرطوبة العالية و البيئات العدوانية الحاوية على أيونات الكلوريد مثل بعض المنشآت البحرية والجسور الطرقية التي تتعرض لأملاح قابلة للانحلال(Nanni, 1993, 3344)، كما تتصف هذه القضبان بقوه الشد الحديه الكبيرة والتي تفوق قوه القضبان الفولاذية ما بين 3 إلى 4 أضعاف، فضلاً عن كون هذه القضبان حياديه تجاه الحقول الكهربائيه والمغناطيسيه والترددات اللاسلكية المختلفة، حيث تعتبر هذه الخاصية مهمه وخاصة في بعض المجالات الطبية كغرف التصوير بالرنين المغناطيسي، بالإضافة لمزايا تكنولوجية متعددة كخفه الوزن وسهولة التشكيل والاستخدام(Wu et al., 2007, 1). تتألف مركبات FRP بشكل عام من الألياف (Fiber) ومن مادة حاضنة (Matrix) لهذه الألياف، حيث تقوم الألياف بتؤمن المقاومة العالية على الشد، بينما تقوم المادة الحاضنة بربط الألياف مع بعضها ونقل الحموله فيما بينها، وتعتبر كل من الألياف والمادة الحاضنة مواد متجانسة الخواص (Isotropic) إذا ما كانت كل مادة منعزلة عن الأخرى، بينما تعتبر مركبات FRP مواد غير متجانسة (Orthotropic)، حيث يكون الأداء الأفضل لها عندما تكون الإجهادات الشادة باتجاه الألياف، بينما تنخفض الخواص الميكانيكية كمقاومة الإجهادات ومعامل المرونة بالاتجاه العرضي، والشكل (1) يبين تمثيل توضيحي لمركبات القضبان البوليمرية المسلحة بالألياف والتمييز بين الاتجاه الطولي الموازي للألياف والاتجاه العرضي.

GFRP والقضبان البوليمرية المسلحة بالألياف الأراميدية مقارنة بمعامل المرونة لقضبان الفولاذية AFRP (ACI 440.1R, 2015, 16) الأمر الذي يؤدي بدوره إلى تشكل سهوم وعرض شقوق أكبر، تحت تأثير الحمولات الاستثمارية التي يتعرض لها الجائز خلال مرحلة الاستثمار. تعد الألياف الزجاجية الأكثر شيوعاً في صناعة قضبان التسلیح من مركبات FRP، وبدرجة أقل الألياف الكربونية والأراميدية نظراً لارتفاع تكلفة إنتاجها، ولكن ظهرت حديثاً الألياف البازلتية كمنافس واعد للألياف الزجاجية في صناعة قضبان FRP نظراً للمزايا الإيجابية والمثبتة حتى الآن التي توفرها القضبان البوليمرية المسلحة بهذه الألياف مقارنة بقضبان GFRP، كفالة الشد الأعلى، المقاومة الكيميائية الأفضل، والمجال الأوسع في تحمل درجات الحرارة التي يمكن أن يتعرض لها المنشآت خلال مرحلة الاستثمار (Chowdhury et al., 2022, 1).

ومن ناحية أخرى 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 سمية، فضلاً عن توافر المواد الأولية لهذه الصناعة وهي الصخور البازلتية في معظم دول العالم (InfoMine Research Group, 2007).

(Wu et al., 2012, 2).

إن ظهور القضبان البوليمرية المسلحة بالألياف البازلتية BFRP حديثاً وعدم اكتمال الدراسات التجريبية المتوفّرة حتى الآن والمتعلقة بدراسة العناصر الإنشائية من الخرسانة المسلحة بها كالجوائز يجعل من الصعوبة بمكان تقييم الأداء الدقيق لهذه الجوائز، الأمر الذي انعكس بغياب المعاملات التصميمية الخاصة بتصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP في ملاحق الأكواد العالمية بأحدث اصداراتها و الخاصة بتصميم العناصر الإنشائية المختلفة باستخدام قضبان التسلیح من مركبات FRP، مثل إرشادات اللجنة الأوروبية الدولية للخرسانة - الاتحاد الدولي للخرسانة (CEB-FIP 2007)

دراسة تجريبية وتحليلية للعزم المقاوم والسهوم في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP

المسلحة بالقضبان الفولاذية حيث يكون الانهيار على الشد (انهيار مطابع) بوصول الإجهاد في قضبان التسلیح الفولاذية إلى إجهاد السيلان (ملحق الكود العربي السوري رقم 18، 67)، وبناء على ما تقدم فإنه يتم توفير نسبة تسلیح ضمن المقطع العرضي للجائز وفق العلاقة (1) أكبر تماماً من نسبة التسلیح التوازنیة وفق العلاقة (2)، لضمان وصول التشوه النسبي للخرسانة في منطقة الضغط إلى قيمته الحدية للانهيار قبل وصول الإجهاد في قضبان التسلیح من مركبات FRP في منطقة الشد إلى الإجهاد الحدي عند الانقطاع وذلك وفق (ACI 440.1R 2015).

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad \text{العلاقة (1)}$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad \text{العلاقة (2)}$$

حيث:

A_f : مساحة التسلیح لقضبان FRP.

b : عرض مقطع الجائز.

d : الارتفاع الفعال للجائز.

β_1 : معامل خاص لتحويل منطقة الضغط بمخطط توزيع الاجهادات إلى مستطيل مكافئ وهو مرتبط بالمقاومة المميزة للخرسانة على الضغط.

f'_c : المقاومة المميزة الأسطوانية للخرسانة على الضغط.

f_{fu} : الإجهاد الحدي التصميمي لقضبان FRP على الشد.

E_f : معامل المرونة بالاتجاه الطولي الخاص بقضبان FRP.

ϵ_{cu} : الانفعال النسبي الحدي للبيتون على الضغط.

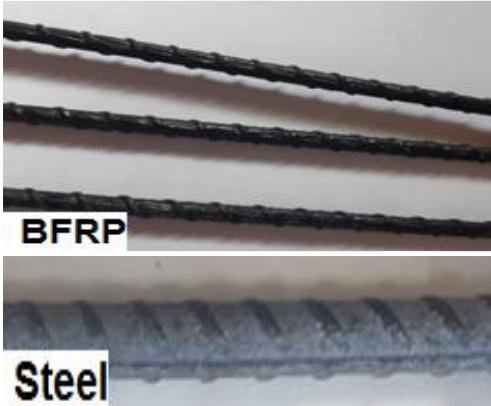
($\epsilon_{cu} = 0.003$).

عادة ما تتشكل حالات الاستثمار الحدية كحدود السهوم وعرض الشقوق المسموح بها الأساس التصميمي للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان من مركبات FRP بالتزامن مع تحقيق متطلبات المقاومة لحالات حدود الانهيار، وذلك بسبب انخفاض صلابة المقطع العرضي للجائز في مرحلة ما بعد التشقق والناتج عن انخفاض معامل المرونة الخاص بقضبان FRP وخاصة القضبان البوليمرية المسلحة بالألياف الزجاجية

مساوية MPa 26.4 و MPa 35.6 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 25mm، ونسبة الماء إلى الاسمنت C/W متساوية إلى 0.49 و 0.4 للخلطتين C1 و C2 على التوالي.

2.2 قضبان التسلیح:

القضبان البوليميرية المسلحة بالألياف البازلتية BFRP المستخدمة ذات سطح ملحزن (Ribbed Surface) بقطر 8 mm كما بالشكل (3)، مؤلفة من ألياف بازلتية مستمرة ذات قطر يتراوح بين 10 و 22 ميكرون مشربة براتنج فينيل الاستر (vinyl-ester)، كما أن محتوى الألياف (حجاماً) هو 70% من الحجم الكلي، وهو ما يتفق مع المواصفة ASTM D3171 (2011) و ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018)، أما قضبان التسلیح الفولاذية المستخدمة كتسليح رئيسي و لتشكيل الأسوار فهي ذات سطح ملحزن كما بالشكل (3) و قطر 8 mm، بينما قضبان التعليق العلوية ملساء بقطر 6 mm واجهاد سيلان MPa 240، والجدول (1) يبيّن ملخص الخصائص الميكانيكية لقضبان التسلیح المستخدمة كتسليح رئيسي سفلي في نماذج الجوائز المختبرة.



الشكل (3) يبيّن سطح قضبان BFRP والقضبان الفولاذية المستخدمة بالبحث. (الدراسة الحالية)

الកود الامریکي (2015) 440.1R ACI، و ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018).

من جهة أخرى تعد الدراسات المتعلقة بدراسة سلوك الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP قليلة نسبياً بالمقارنة مع الدراسات المتوفّرة حول استخدام القضبان من مركبات FRP الأخرى وخاصة الزجاجية GFRP، من هذه الدراسات دراسة أجراها Lapko وأخرون (2015) شملت اختبار عدد من الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP، وخلصت 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، نتائج مشابهة ظهرت في دراسة أخرى قام بها PAWLOWSKI وأخرون (2015)، وأكد ذلك Elgabbas وأخرون في دراسة لهم عام (2016) والتي توصلوا فيها أيضاً إلى وجود تباين مهم بلغت نسبة 28% بين متوسط العزم المقاوم وفق (ACI 2015) (440.1R، 2015) والعزم الذي انهارت عنده الجوائز الخرسانية المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد مدى ملائمة استخدام الصيغ الحسابية التي توفرها إرشادات ACI، CEB-FIP (2007) (ACI 440.1R 2015) لقييم العزم المقاوم والسهوم في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP، وذلك من خلال مقارنة القيم التحليلية وفق هذه الصيغ مع القيم الناتجة من الدراسة التجريبية للجوائز المختبرة في هذه الدراسة، والتي تهدف أيضاً إلى تحديد تأثير البارامترات الرئيسية (نسبة التسلیح والمقاومة المميزة للخرسانة على الضغط) على قيم العزم المقاوم والسهوم في هذه الجوائز.

2. طرائق البحث ومواده:

1.2 الخرسانة:

تم استخدام مقاومتين للخرسانة على الضغط C1 و C2، حيث تم تحديد المقاومة المميزة الاسطوانية على الضغط تجربياً وكانت

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

نوع مادة القضيب	قطر (mm)	معامل المرونة E_f (GPa)	الإجهاد الدلي f_{fu} (MPa)	اجهاد السيلان f_y (MPa)	التشوه النسبي (%)
BFRP	8	44.5	1157	-	2.6
Steel		210	-	420	0.21

- الرمز الأول من اسم الجائز "B" للدلالة على الجائز.
- الرمز الثاني من اسم الجائز "B" أو "S" للدلالة على نوع مادة قضبان التسلیح السفلي الرئيسي، حيث B للدلالة على قضبان BFRP و S للدلالة على القضبان الفولاذية.
- الرمز "2-308" للدلالة على عدد القضبان وقطرها.
- الرمز "C1" للدلالة على المقاومة المميزة الاسطوانية للخرسانة على الضغط.

تم تصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP وفق الكود الأمريكي (2015) ACI 440.1R لتنهار على الضغط حيث نسبة تسليحها أكبر تماماً من نسبة التسلیح التوازنية وفق العلاقات (1) و (2) المذكورة أعلاه، في حين تم تصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بالقضبان الفولاذية لتنهار على الشد حيث نسبة تسليحها أصغر تماماً من نسبة التسلیح التوازنية، وهو النمط التقليدي لتصميم الجوائز الخرسانية المسلحة بالقضبان الفولاذية.

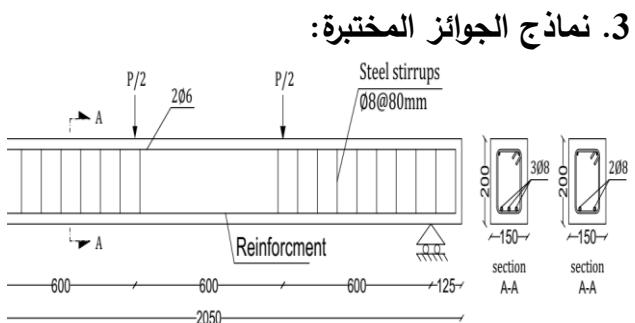
4. إجراءات وأالية الاختبار:

تم توزيع القوة المركزية الكلية المطبقة التي يولدها جهاز الاختبار إلى قوتين مركزيتين ومتباينتين عبر جسر معدني أعلى الجائز المختبر كما بالشكل (5)، بحيث تبعد كل قوة منها مسافة 600 mm عن المسند المجاور.



الشكل (5) جهاز وأالية الاختبار.

تضمن طريقة التحميل السابقة تعرض المجاز الوسطي للجاز بين نقطتي التحميل إلى عزم انعطاف صافي تحت تأثير القوتين المركزيتين المطبقتين على الوجه العلوي للجاز، بحيث تكون اجهادات الشد الناتجة عن العزم المطبق عند الوجه السفلي، بينما تكون اجهادات الضغط على الوجه العلوي. تم



الشكل (4) تفاصيل التسلیح والأبعاد لنماذج الجوائز المختبرة. يبيّن الشكل (4) نماذج الجوائز المختبرة وتوزع قضبان التسلیح الطولي والعرضي ضمن الجائز. يبلغ مجاز كل جائز 1800mm والمقطع العرضي 150*200 mm. التغطية لقضبان التسلیح العلوية والسفلية متساوية إلى 25 mm. الجدول (2) يبيّن ملخص لنماذج الجوائز المختبرة ونسبة التسلیح والمقاومة المميزة الاسطوانية للخرسانة على الضغط لكل جائز.

الجدول (2) نماذج الجوائز المختبرة ونسبة تسليحها.

التسليح	اسم الجائز	ρ_f	ACI 440.1R (2015)	
			ρ_{fb}	ρ_f
1	BB 208 - C1	0.0041	0.0017	2.41
2	BB 208 - C2	0.0041	0.0022	1.86
3	BB 308 - C1	0.0061	0.0017	3.59
4	BB 308 - C2	0.0061	0.0022	2.77
5	BS 208 - C1	0.0041	0.0286	0.14
6	BS 308 - C1	0.0061	0.0286	0.21

ملاحظة على الجدول (2):

18 رقم (2007) CEB-FIB وملحق الكود العربي السوري (CEB-FIB) رقم 18 (2018).

الجدول (3) يبين ملخص النتائج التجريبية (عزم التشقق، العزم المقاوم الاسمي عند الانهيار) للجوائز المختبرة ومقارنتها مع القيم التحليلية.

		$M_{Exp.}/M_{Pre.}$				النتائج التجريبية - العزم المقاوم				الجائز	
ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018)		CEB - FIB (2007)		ACI 440.1R (2015)		Experimental M (kN.m)				الجائز	
M_n	M_{cr}	M_n	M_{cr}	M_n	M_{cr}	نقط الانهيار	M_n	M_{cr}			
0.94	0.91	1.10	1.06	0.90	0.84	ضغط	11.1	2.82	BB 208 - C1		
0.89	0.94	1.04	1.04	0.80	0.91	ضغط	12.5	3.38	BB 208 - C2		
0.93	0.93	1.07	1.08	0.96	0.86	ضغط	12.8	2.88	BB 308 - C1		
0.90	0.95	1.05	1.05	0.97	0.92	ضغط	15.00	3.42	BB 308 - C2		
-	-	-	-	-	-	شد	6.8	3	BS 208 - C1		
-	-	-	-	-	-	شد	9.7	3.1	BS 308 - C1		
0.91	0.93	1.07	1.06	0.91	0.88	المتوسط					
0.02	0.02	0.03	0.02	0.08	0.04	الانحراف المعايير					

كما هو مبين في الجدول (3) فإن العزم المطبق عند بداية التشقق في الجوائز المسلحة بقضبان BFRP تراوح ما بين 2.82 kN.m إلى 3.42 kN.m، حيث يمكن ملاحظة تأثير المقاومة المميزة للخرسانة على الضغط على قيمة عزم التشقق في الجوائز المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP، فزيادة المقاومة المميزة الاسطوانية للخرسانة على الضغط بنسبة حوالي 35% في الجوائز ذات الخرسانة C2 حيث ($f'c = 35.64 \text{ MPa}$) أدى إلى زيادة قيمة عزم التشقق لهذه الجوائز بنسبة حوالي 20% مقارنة بالجوائز ذات الخرسانة C1 حيث ($f'c = 26.42 \text{ MPa}$) والتي لها نفس نسب التسلیح، في حين كان تأثير نسبة التسلیح على قيمة عزم التشقق صغير نسبياً ولم يتجاوز 6%， حيث يمكن ملاحظة ذلك عند المقارنة بين الجوائز ذات الخرسانة نفسها مع اختلاف نسبة التسلیح.

كما تبین النتائج التجريبية للجوائز المختبرة وفق الجدول (3) أنه مع زيادة نسبة التسلیح 50% فإن العزم المقاوم النهائي للجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP زاد بنسبة تراوحت ما بين 15% و 20%， فيما زاد بنسبة 43% في الجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية، ويرجع السبب في ذلك إلى

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 35 طن، مع إمكانية التحكم بمعدل تزايد القوة التي يولدها، حيث تم تطبيق هذه القوة بتزايد ثابت مساواً إلى 1.5 kN/SEC. تم طلاء وجه الجائز بطلاء أبيض وتحطيطها وفق تقسيمات معينة وذلك لتسهيل عملية مراقبة أماكن تشك الشقوق الحاصلة أثناء الاختبار.

5. نتائج الاختبار والمناقشة:

1.5 أنماط التشقق والانهيار:

يبين الشكل (6) أنماط التشقق الحاصلة في الجوائز الخرسانية المختبرة عند الانهيار، حيث بدأت التشققات بالظهور في منطقة العزم الثابت بين نقطتي التحميل وبشكل عامودي على محور الجائز ابتداء من الوجه السفلي للجاز في منطقة الشد باتجاه منطقة الضغط أعلى الجائز وذلك لجميع الجوائز المختبرة، ومع زيادة مستوى التحميل ظهرت شقوق إضافية خارج منطقة العزم الثابت بين نقطتي التحميل باتجاه المساند في الجوائز المسلحة بقضبان BFRP، وكانت هذه الشقوق تميل عن المحور الأفقي للجاز بسبب تراكب الإجهادات، وهو النمط التقليدي لتشكل الشقوق في الجوائز الخرسانية بسيطة الاستئصال، وعند وصول العزم المطبق إلى قيمة تساوي قدرة تحمل الجائز ظهرت شقوق "تصدعات" أفقية مفاجئة عند السطح العلوي للجاز في المنطقة المضغوطة بين نقطتي التحميل، لينهار الجائز بتحطم الخرسانة عند الوجه العلوي ويخرج الجائز عن العمل، أما بالنسبة للجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية فإن الانهيار حدث بتوسيع تدريجي لشق الانعطاف الرئيسي وسط المجاز ووصوله إلى منطقة الضغط أعلى الجائز بالتزامن مع تجاوز اجهادات الشد في القضبان الفولاذية عتبة السيلان.

2.5 عزم التشقق والعزم المقاوم الاسمي:

يبين الجدول (3) ملخص النتائج التجريبية للجوائز المختبرة، ومقارنتها مع القيم التحليلية وفق (ACI 440.1R 2015)،

الضغط، فإن الجوائز المسلحة بقضبان BFRP انهارت عند عزم أعلى بنسبة تراوحت ما بين 32% و 63% من الجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية (العزم الذي يبدأ عند الاجهاد في القضبان الفولاذية بتجاوز اجهاد السيلان).

من ناحية أخرى و بالمقارنة بين القيم التحليلية و التجريبية لعزم التشقق في الجوائز المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP، فإن متوسط العزم المطبق المسوب للتشقق كان أقل بنسبة 12% و 7% من متوسط عزم التشقق التحليلي وفق (ACI 440.1R 2015) و ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018) على التوالي، بينما كان أكبر بنسبة 6% من متوسط عزم التشقق وفق (CEB-FIB 2007) كما هو مبين في الجدول (3)، يظهر هذا التباين بسبب كون إجهاد الشد الأقصى للخرسانة على الانعطاف وفق ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018) والذي يعطي وفق العلاقة (4) أصغر بنسبة حوالي 3.5% مقارنة بالكود الأمريكي (ACI 440.1R 2015) وفق العلاقة (5)، بينما يكون وفق (CEB - FIB 2007) كما بالعلاقة (6).

$$M_{cr} = \frac{f_r * I_g}{y_t} \quad \text{العلاقة (3)}$$

$$f_r = 0.6 * \sqrt{f_c'} \quad \text{العلاقة (4)}$$

$$f_r = 0.62 * \sqrt{f_c'} \quad \text{العلاقة (5)}$$

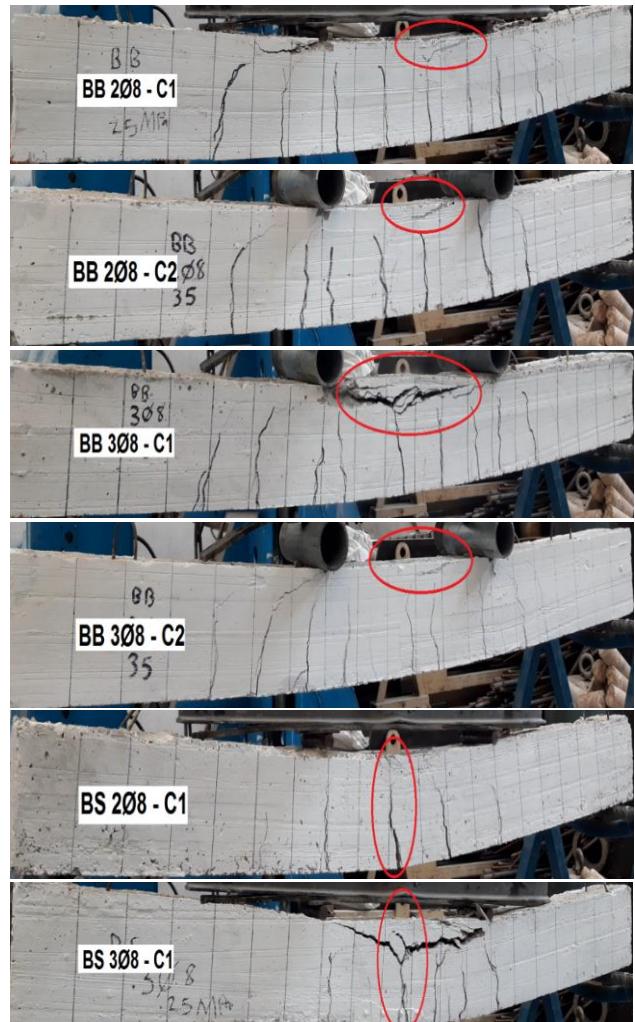
$$f_r = 0.3 * (f_{ck})^{(2/3)} \quad \text{العلاقة (6)}$$

أما متوسط العزم المقاوم عند الانهيار للجوائز المختبرة و المسلحة بقضبان BFRP فقد كان أصغر بنسبة 9% من العزم وفق (ACI 440.1R 2015) و ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018)، بينما كان أكبر بنسبة 7% من العزم وفق CEB-FIP (2007).

3.5 السهم:

يمكن تقسيم سلوك السهم في الجوائز الخرسانية المسلحة بالقضبان من مركبات FRP والخاضعة لعزم انحناء "انعطاف" إلى مرحلتين متباينتين، قبل التشقق وبعده، ففي المرحلة الأولى والتي يكون فيها المقطع العرضي غير متشقق فإن سلوك

انخفاض معامل المرونة المميزة لقضبان BFRP مقارنة بالقضبان الفولاذية، بالمقابل فإن زيادة مقاومة المميزة للخرسانة على الضغط بنسبة حوالي 35% في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP أدى إلى زيادة مقاومة هذه الجوائز لتحمل العزم المطبق عند الانهيار بنسب تراوحت ما بين 13% و 17%.



الشكل (6) يبين الجوائز المختبرة وأنماط التشقق الحاصلة عند الانهيار.

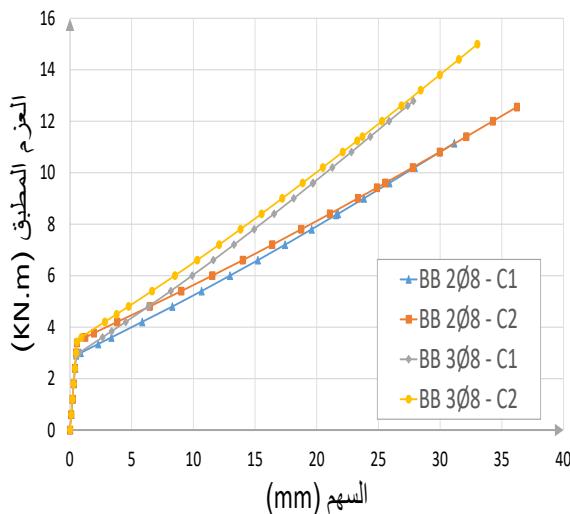
مقارنة العزم المقاوم عند الانهيار وفق الجدول (3) بين الجوائز المسلحة بقضبان BFRP والجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية والتي لها نفس نسبة التسليح والمقاومة المميزة للخرسانة على

والعلاقة (13) تبين حساب السهم الآني لجائز بيتواني مسلح بسيط الاستناد يتعرض لحمولتين مركزتين ($\frac{P_a}{2}$) تبعد كل منهما مسافة (a) عن المسند المجاور.

$$\delta = \frac{\frac{P_a}{2} * a}{24 E_c I_e} (3L^2 - 4a^2) \quad \text{العلاقة (13)}$$

حيث يتم استخدام $\frac{M_a}{E_c I_g}$ للجزء غير المتشقق للجائز عندما يكون العزم المطبق أصغر من عزم التشقق ($M_a < M_{cr}$), بينما يتم استخدام $\frac{M_a}{E_c I_e}$ للجزء المتشقق للجائز عندما يكون العزم المطبق أكبر من عزم التشقق.

يبين الشكل (7) السهم (الانحراف) بمنتصف المجاز للجوائز المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP مقابل العزم المطبق، حيث يمكن ملاحظة التصرف المتقارب للجوائز حتى سويات الحمل المسببة للتشقق، مما يدل على التأثير القليل لنسبة التسليح على صلابة المقطع غير المتشقق، فيما يظهر التباين في منحنى العلاقة (سهم - عزم مطبق) للجوائز في مرحلة ما بعد التشقق.



الشكل (7) منحنى العلاقة (السهم - العزم المطبق) للجوائز الخرسانية المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP.

العنصر الخرساني يحكمه I_g (عزم العطالة الكلي)، أما المرحلة الثانية حيث يكون العزم المطبق M_a أكبر من عزم التشقق M_{cr} فيصبح سلوك العنصر الخرساني يحكمه I_e (عزم العطالة الفعال)، حيث تنخفض صلابة المقطع العرضي للجائز بسبب التشقق الحاصل.

تستند معادلة تحديد عزم العطالة الفعال I_e وفق ملحق الكود السوري رقم 18 (2018) للمقطع المتشقق إلى الصيغة المقترنة من قبل (Branson, 1968, 738) وفق العلاقة (7)، حيث تم استخدام المعامل β_d لتلائم استخدام القضبان من مركبات FRP بدلاً من القضبان الفولاذية.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (7)$$

و يتم تحديد قيمة المعامل β_d من العلاقة (8).

$$\beta_d = 0.5 * \left(\frac{E_f}{E_S} \right) \quad (8)$$

بينما يوصي (ACI 440.1R 2015) باستخدام صيغة Bischoff et al., 2009, 73) تتضمن هذه الصيغة إضافة المعامل γ لمراقبة تغير الصلابة على طول العنصر، و تعطى قيمته وفق العلاقة (10).

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \leq I_g : M_a \geq M_{cr} \quad (9)$$

$$\gamma = 1.72 - 0.72 (M_{cr}/M_a) \quad (10)$$

في حين يوصي CEB-FIP (2007) باستخدام صيغة Bischoff et al., 2007, 76) التي تستند إلى الكود الأوروبي Bischoff (Eurocode2, 2004) وأخرون (2007) أن معادلتهم قابلة للتطبيق على الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان فولاذية أو قضبان من مركبات FRP، فيتمأخذ خصائص المقطع العرضي للجائز للحالتين المتشقة وغير المتشقة وفق العلاقة (11).

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \eta \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2} \leq I_g \quad (11)$$

و تعطى قيمة η وفق العلاقة (12):

حيث I_{cr} هو عزم عطالة المقطع العرضي المتشقق للجائز.

الجدول (5) مقارنة بين القيم التحليلية والتجريبية للسهم في الجواائز BFRP المختبرة والمسلحة بقضبان

العزم المقاوم $M_n = 0.75 M_{n,0}$ للجائز (BB - C2) (أي عزم مطبق 9.4 kN.m)، فإن زيادة نسبة التسلیح بنسبة 50% بالجائز (BB - C2) خفض قيمة السهم الحاصل بنسبة 26% (من القيمة $\delta = 24.8 \text{ mm}$ إلى القيمة $\delta = 18.3 \text{ mm}$)، بينما كان تأثير المقاومة المميزة للخرسانة على الضغط على قيمة السهم الحاصل في الجواائز المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP قليل مقارنة بتأثير نسبة التسلیح، فزيادة مقاومة الخرسانة على الضغط بنسبة حوالي 35% في الجائزين (BB - C2) و (BB - C1) أدى إلى خفض قيمة السهم الحاصل بنسبة حوالي 64% و 5% فقط مقارنة بالجائزين (BB - C2) و (BB - C1) على التوالي، وذلك عند سوية عزم مطبق موافقة 0.75 M_n لكل من الجائزين (BB - C2) و (BB - C1) على التوالي.

يبين الجدول (5) مقارنة القيم التحليلية للسهم وفق الجدول (5) مع القيم التجريبية عند العربي السوري رقم 18 (2018) مع القيم التجريبية عند سويات تحمل موافقة 30% و 75% من العزم المقاوم عند الانهيار للجواائز المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP. تبين نتائج المقارنة بين القيم التحليلية والتجريبية للسهم وفق الجدول (5) أنه عند سوية حمل منخفضة موافقة 30% من العزم المقاوم النهائي (الحمل الخدمي الافتراضي) للجواائز الخرسانية المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP فإن CEB-FIP (2007) و ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018) تبالغ في تقدير قيمة السهم الحاصل بنسبة 14% و 55% على التوالي، على عكس ACI 440.1R (2015) الذي يخفض قيمته بنسبة 39%， أما عند سوية حمل مرتفعة موافقة 75% من العزم المقاوم النهائي فإن التوافق كان جيداً بين القيم التحليلية للسهم وفق CEB-FIP (2007) و ACI 440.1R (2015) و القيمة التجريبية بتباين لم يتجاوز 3%， في حين كان ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018) متحفظاً في تقدير قيمة

الجدول (5) مقارنة بين القيم التحليلية والتجريبية للسهم في الجواائز BFRP المختبرة والمسلحة بقضبان

	$\delta_{exp.}/\delta_{pre.}$					الجائز
	ملحق الكود السوري رقم (2018) 18	CEB - FIB (2007)	ACI 440.1R (2015)			
0.75 M_n	0.3 M_n	0.75 M_n	0.3 M_n	0.75 M_n	0.3 M_n	
0.80	0.45	0.99	0.91	0.95	1.75	BB 208-C1
0.79	0.34	0.97	0.77	0.97	1.53	BB 208-C2
0.86	0.51	1.08	0.90	0.99	1.14	BB 308-C1
0.86	0.51	1.07	0.89	1.03	1.16	BB 308-C2
0.83	0.45	1.03	0.86	0.99	1.39	المتوسط
0.04	0.08	0.05	0.07	0.03	0.30	الانحراف المعياري

والجدول (4) يبين ملخصقيم السهم الحاصل في الجواائز الخرسانية المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP عند سويات تحمل مختلفة، وفي هذا السياق تجدر الإشارة إلى أنه وبحسب (Bischoff et al., 2009)، (Mota et al., 2006) (El-Nemr et al., 2013) فإنه يمكن اعتبار سوية الحمل الموافقة 30% من العزم المقاوم النهائي عند الانهيار للجواائز المختبرة هي السوية الموافقة للأحمال الخدمية التي يمكن يتعرض لها الجائز خلال مرحلة الاستثمار عند وجوده ضمن الهيكل الإنشائي لمنش

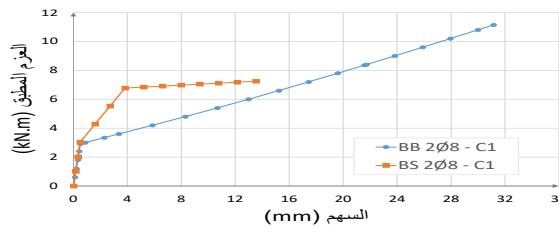
الجدول (4) قيم السهوم عند سويات تحمل مختلفة في الجواائز المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP.

	النتائج التجريبية - السهم Experimental δ (mm)				الجائز
	M_n	0.75 M_n	0.3 M_n	M_{cr}	
31.1	21.6	2.3	0.5	BB 208 - C1	
36.2	24.8	1.9	0.6	BB 208 - C2	
27.8	19.7	3.4	0.5	BB 308 - C1	
33.0	23.1	3.8	0.6	BB 308 - C2	

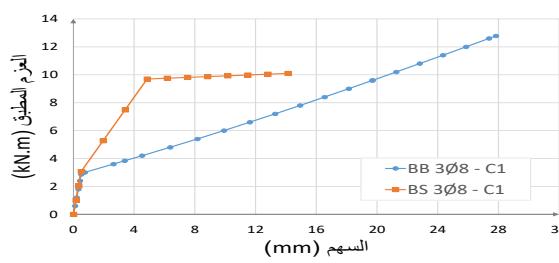
من الشكل (7) و الجدول (4) وبالمقارنة بين الجائزين (BB 208 - C1) و (BB 308 - C1) عند سوية عزم مطبق موافقة 8.4 M_n للجائز (BB 208 - C1) (أي عزم مطبق 9.4 kN.m) فإن قيمة السهم الحاصل في الجائز $\delta = 21.6 \text{ mm}$ انخفضت بنسبة 24% مع زيادة نسبة التسلیح 50% (C1) (C1) من القيمة $\delta = 21.6 \text{ mm}$ إلى القيمة $\delta = 16.4 \text{ mm}$ ، كذلك الأمر و عند نفس سوية عزم موافقة

نفس نسبة تسليح والمقاومة المميزة للخرسانة على الضغط، فإن الجوائز المسلحة بقضبان BFRP أبدت سهوم أكبر في مرحلة مابعد التشقق، فعند مستوى الحمل الموفق لبداية تجاوز الاجهاد في القضبان الفولاذية إجهاد السيلان في الجوائز الخرسانية المسلحة بالقضبان الفولاذية

(BS 2Ø8 - C1) كانت قيمة السهم BFRP في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان (BB 2Ø8 - C1) أكبر بـ 3.7 و 4 أضعاف (BB 3Ø8 - C1) على التوالي، ويرجع السبب في ذلك إلى انخفاض معامل المرونة الخاص بقضبان BFRP مقارنة بمعامل المرونة الخاصة بقضبان التسليح الفولاذية، مما يؤدي بدوره إلى انخفاض صلابة المقطع العرضي المتشقق للجهاز.



a



b

الشكل (9) مقارنة منحني العلاقة (السهم - العزم المطبق) بين الجوائز الخرسانية المختبرة والتي لها نفس نسب نسق تسليح من قضبان BFRP والقضبان الفولاذية.

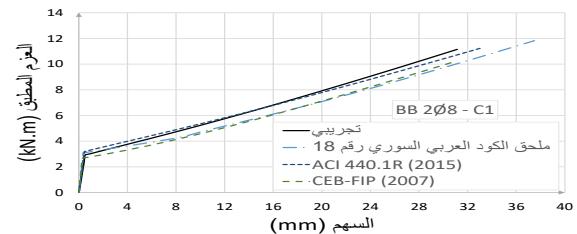
6. الاستنتاجات والتوصيات:

1.6 الاستنتاجات:

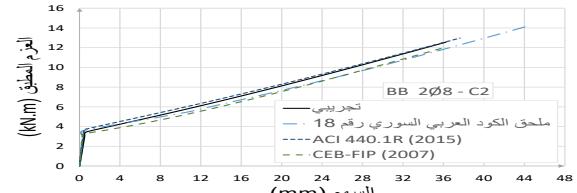
1. كان التوافق جيد بين القيم التحليلية والتجريبية لعزم التشقق والعزم المقاوم عند الانهيار في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP بفروقات كان أكبرها 12% وفق (ACI 440.1R (2015) وفق CEB-FIP (2007)، وأصغرها 6% وفق

السهم الحاصل بنسبة 17%， والأشكال (8-a,b,c,d) تبين مقارنة المنحني المميز لعلاقة (السهم-العزم المطبق) للجوائز المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP ومقارنتها مع السهوم التحليلية وفق (ACI 440.1R (2015)

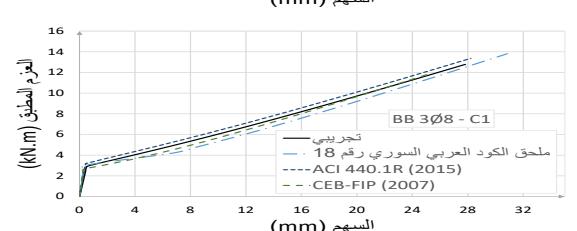
CEB-FIP (2007) وملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018)، وذلك للجهاز (BB 2Ø8 - C1)، (BB 2Ø8 - C2) و (BB 3Ø8 - C2) على التوالي.



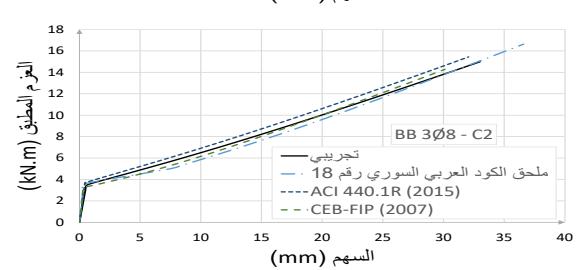
a



b



c



d

الشكل (8) مقارنة منحني العلاقة (السهم - العزم المطبق) بين الدراسة التحليلية والتجريبية للجوائز المختبرة.

من ناحية أخرى وبالمقارنة بين الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP والجهاز المسلح بالقضبان الفولاذية والتي لها

2. عند سوية حمل منخفضة موافقة 30% من العزم المقاوم النهائي (الحمل الخدمي الافتراضي) للجوائز الخرسانية المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP فإن (CEB-FIP 2007) وملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018) تبالغ في تقدير قيمة السهم الحاصل بنسبة 14% على التوالي، على عكس (ACI 440.1R 2015)، الذي يخفض قيمته بنسبة 39%.
3. عند سوية حمل مرتفعة موافقة 75% من العزم المقاوم النهائي للجوائز الخرسانية المختبرة والمسلحة بقضبان ACI كان التوافق جيداً بين القيم التحليلية للسهم وفق (ACI 440.1R 2015 و CEB-FI 2007) والقيم التجريبية بفرقettes لم تتجاوز 3%， في حين كان ملحق الكود العربي السوري رقم 18 (2018) متحفظاً في تقدير قيمة السهم الحاصل بنسبة 17% لصالح الأمان.
4. أدت زيادة نسبة التسلیح 50% في الجوائز الخرسانية المسلحة بقضبان BFRP إلى زيادة العزم المقاوم لهذه الجوائز عند الانهيار بنسبة تراوحت ما بين 15% و 20%， بينما أدت نفس الزيادة لنسبة التسلیح إلى زيادة بلغت 43% للعزم المقاوم عند الانهيار في الجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية، ويرجع السبب في ذلك إلى انخفاض معامل المرونة الخاصة بقضبان BFRP مقارنة بمعامل مرونة القضبان الفولاذية.
5. أدت زيادة المقاومة المميزة للخرسانة على الضغط بنسبة حوالي 35% في الجوائز المسلحة بقضبان BFRP إلى زيادة العزم المقاوم لهذه الجوائز عند الانهيار بنسبة تراوحت ما بين 13% و 17%.
6. من أجل نفس نسبة التسلیح والمقاومة المميزة للخرسانة على الضغط فإن الجوائز المسلحة بقضبان BFRP انهارت عند عزم مطبق أكبر من الجوائز المسلحة بالقضبان الفولاذية بنسبة تراوحت ما بين 32% و 63%.
7. كان تأثير نسبة التسلیح على السهم الحاصل في الجوائز المختبرة والمسلحة بقضبان BFRP قليلاً نسبياً في مرحلة ما قبل التشقق، بينما أدت زيادة نسبة التسلیح 50% إلى تحفيض

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

-
10. 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.
 11. 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.
 12. InfoMine Research Group. (2007). "Basalt Fiber-Based Thermal Insulating Materials Market Research in Russia." Moscow.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Nanni, A. (1993), "Flexural Behavior and Design of RC Members using FRP Reinforcement." *ASCE Journal of Structural Engineering*, 119 (11), 3344–3359.
 16. Pawłowski, D., & Szumigała, M. (2015). "An experimental and theoretical study of deflections of BFRP RC beams." *Technical Transactions of Civil Engineering*, (Y. 112, iss. 4-B), 63-70.
 17. 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.
 18. 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.

References:

- الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت، القصبان البوليمرية المسلحة بالألياف (2018)، الملحق 18، منشورات نقابة المهندسين، سوريا.
1. 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.
 2. ASTM D3171 (2011). "Standard Test Method for Constituent Content of Composite Materials." American Society for Testing and Material, Conshohocken, USA, 11 pp.
 3. Bischoff, P. H., & Scanlon, A. (2007). "Effective moment of inertia for calculating deflections of concrete members containing steel reinforcement and fiber-reinforced polymer reinforcement." *ACI Structural Journal*, 104 (1), 68–79.
 4. 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.
 5. Branson, D.E. (1968). "Design Procedures for Computing Deflections." *ACI Journal Proceedings*, 65 (9), 730–742.
 6. BS EN 1992-1 (2004), "Eurocode2, Design of Concrete Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings", European committee for standardization CEN.
 7. CEB-FIP. (2007), "Fib Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures". The International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland.
 8. CEB-FIP. (2010), "Fib Bulletin 55: Model Code 2010, First complete draft – Volume 1". The International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland.
 9. 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.