

## تأثير تغير نسبة التسليح الهجين (فولاذ - كربون CFRP) على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المعرضة للانحناء

الدكتور غاندي علي ججاج\*

الدكتور أحمد علي عبود\*\*

ميرفت حسن حشمة\*\*\*

(تاريخ الإيداع 18 / 9 / 2013. قُبِلَ للنشر في 28 / 1 / 2014)

### □ ملخص □

يعتبر تسليح العناصر البيتونية تسليحاً مشتركاً (هجيناً) بقضبان فولاذية و كربونية CFRP أمراً واعداً ومفيداً نظراً لما يحققه هذا التسليح المشترك من قوة وقابلية للتشغيل بالإضافة للمتانة العالية والديمومة، وذلك في حال الاستعاضة عن قضبان التسليح الفولاذية في زوايا مقاطع العناصر بقضبان كربونية لا تصدأ وذات مقاومة عالية. قمنا بدراسة تجريبية على جوائز بيتونية متماثلة ومسلحة بقضبان فولاذية أو كربونية، أو بشكل هجين بقضبان فولاذية وكربونية معاً، وذلك لإثبات مدى فاعلية تسليح العناصر البيتونية بهذه الأنواع المختلفة من التسليح و لمقارنة سلوكها. جرت عملية الاختبار على 12 جائزة مقسمة إلى أربع مجموعات في كل منها ثلاثة جوائز وكان المتغير الأساسي هو نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية. وأبدت الجوائز المسلحة بقضبان كربونية قدرات تحمل أعلى بالمقارنة مع الجوائز الأخرى، كما ازدادت قدرات التحمل في الجوائز المسلحة بشكل هجين وفق النسب التالية: (0-10-15-22) %، عند ازدياد نسبة التسليح بالكربون في مقطعها إلى نسبة التسليح الكلية وفق النسب (0-33.3-66.6-100) % بالتتالي.

**الكلمات المفتاحية:** جوائز بيتونية مسلحة، تسليح هجين، قضبان كربونية، السلوك، السهم، قدرة التحمل القصوى، التشققات.

\*أستاذ- قسم الهندسة الإنشائية- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

\*\*أستاذ- قسم الهندسة الإنشائية- كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

\*\*\* طالبة دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الهندسة الإنشائية- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

## The Effect of Changing the Hybrid Reinforcement Rate (Steel- CFRP) on the Flexural Behavior of Reinforcing Concrete Beams

Dr Ghandi Ali Jahjah\*  
Dr Ahmad Ali Aboud\*\*  
Mervat Hasan Heshmah\*\*\*

(Received 18 / 9 / 2013. Accepted 28 / 1 / 2014)

### □ABSTRACT□

Reinforcing concrete elements with a combination (hybrid) of steel and carbon CFRP bars is considered promising in terms of strength, serviceability, and durability, especially in the case of replacing steel bars in the corners of the element-sections by carbon rods which don't rust and have a high strength. To prove the effectiveness of reinforcing concrete elements with different types of reinforcement, and to compare the behavior of these elements, we have experimentally investigated the behavior of uniform concrete beams reinforced with either steel or carbon bars or steel and carbon together (hybrid reinforcement). 12 beams were divided into four groups each; three beams were tested. The amount of CFRP reinforcement and the CFRP ratio of the total reinforcement were the main parameters investigated. Concrete beams reinforced with carbon rods exhibited a higher load carrying capacity compared with other beams. Also, the load carrying capacity increased in the concrete beams reinforced with hybrid reinforcement, according to the following rates (0-10-15-22)%, by increasing the CFRP ratio of the total reinforcement in their sections, according to the following rates (0-33.3-66.6-100%), respectively.

**Keywords:** Reinforced concrete beams, hybrid reinforcement, carbon bars, behavior, deflection, load carrying capacity, cracks.

---

\* Professor, Department of Structural Engineering Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\* Professor, Department of Structural Engineering Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*\* Postgraduate Student, Department of Structural Engineering Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة:

يعتبر صدأ قضبان التسليح في البيتون أحد الأسباب المؤدية إلى تضرر المنشآت البيتونية المسلحة وانهارها. وفي الشروط الاستثنائية الطبيعية تعتبر عملية كربنة البيتون السبب الرئيسي للصدأ ففي المرحلة الأولى من عمر البيتون المسلح تكون قضبان التسليح خالية من الصدأ نتيجة القلوية العالية في مسامات البيتون المائية، حيث درجة الـ  $ph$  أكبر من 12.5، مما يؤدي إلى تشكل قشرة خاملة على سطح قضبان التسليح. ولاحقاً تسبب عملية كربنة البيتون تخفيض درجة القلوية في الوسط المحيط بالقضبان الفولاذية وفي نفس الوقت يخترق الأكسجين والرطوبة وعوامل أخرى هذا الوسط لتصل إلى فولاذ التسليح ويبدأ الصدأ [1].

تتعلق عملية الصدأ بسماكة طبقة التغطية وحدوث تشققات في العناصر البيتونية، وغالباً ما تبدأ في زوايا هذه العناصر للأسباب التالية:- حصول كربنة عالية للبيتون في هذه المناطق نتيجة التآكل ثنائي البعد - سهولة اختراق الأكسجين والرطوبة- سهولة تنشيط هذه المناطق بالمقارنة مع مناطق أخرى من مقطع العناصر الإنشائية [1]. وبناء عليه فإن الصدأ يؤدي إلى تنشيط طبقة التغطية البيتونية أولاً وهذا يؤدي إلى تسريع عملية الصدأ في القضبان الداخلية. ويمكن زيادة مقاومة البيتون المسلح لعملية الصدأ عن طريق تحسين نوعية البيتون وزيادة سماكة طبقة التغطية والاستعاضة عن قضبان التسليح الفولاذية في زوايا مقاطع العناصر بقضبان غير قابلة للصدأ مثل القضبان الكربونية CFRP.

تعتبر القضبان الكربونية خياراً واعداً وبديلاً عن القضبان الفولاذية في تسليح العناصر البيتونية وخصوصاً في الأوساط الملوثة نتيجة مقاومتها العالية على الشد (2300MPa) مقارنة مع القضبان الفولاذية وطبيعتها المقاومة للصدأ ووزنها الخفيف [2].

تمت عالمياً دراسة الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان من الـ FRP بشكل موسع وقد أصدرت العديد من البلدان كودات تصميمية للعناصر المسلحة بقضبان من الـ FRP مثل (JSCE, CSA, ACI) [3]، ومع أن قضبان الـ FRP تسلك سلوكاً مرناً خطياً حتى انقطاعها، غير أن الجوائز البيتونية المسلحة بها تسلك سلوكاً مختلفاً بالمقارنة مع الجوائز المسلحة بالفولاذ [2].

تعاني الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان FRP (ذات عامل المرونة المنخفض) من سهوم كبيرة وتشققات واسعة إذا ما قورنت بجوائز بيتونية مسلحة بالفولاذ ومماثلة لها من ناحية الأبعاد الهندسية ومساحة قضبان التسليح، لذلك السلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة بقضبان بوليميرية تحت تأثير حمولات استثمارية حدية هو المعيار التصميمي لهذه الجوائز وليس السلوك تحت تأثير حمولات حدية، وبالتالي لا يمكن الاستفادة من كامل قدرة قضبان الـ FRP على الشد [4]. ومن جهة أخرى فإن التكاليف الأولية المرتفعة لقضبان الـ FRP يعتبر مانعاً لاستخدامها في تسليح المنشآت البيتونية، ولكن هذه التكاليف يمكن تجاهلها أو تصبح معقولة عند التفكير بتكاليف الصيانة البعيدة الأمد، إذ إن المنشآت البيتونية المسلحة بقضبان FRP لا تحتاج لصيانة كونها لا تصدأ وليست بحاجة للحماية، وباعتبارها أيضاً لا تتمغنط وغير ناقلة للكهرباء فقد تشكل الخيار الوحيد في تسليح البيتون في غرف الإنعاش أو المراكز البحثية التي قد يشكل فولاذ التسليح عاملاً مشوشاً على أجهزتها الدقيقة [2].

يمكن اقتراح التسليح المشترك بقضبان فولاذية وأخرى بوليميرية كحل عملي وتصميمي للجوائز البيتونية [5]، فتحسين مرونة هذه الجوائز يتحقق بوضع قضبان الـ FRP عند زوايا المقطع أو في المناطق القريبة

لحافة المقطع في المناطق المشدودة بينما القضبان الفولاذية تتوضع في الداخل بعيداً عن حواف المقطع أو في مستويات أعلى ضمن المناطق المشدودة في المقطع.

يؤمن التطاول في القضبان الفولاذية المرنة في حين أن قدرة قضبان الـFRP العالية على الشد تزيد من قدرة تحمل الجوائز [6]. وإضافةً لنسبة معقولة من مساحة الفولاذ إلى مساحة FRP تجعل الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين تنتشوه بشكل أقل من الجوائز المسلحة فقط بقضبان FRP. ويؤدي وجود قضبان فولاذية إلى تخفيض عرض التشققات، ففي شروط الاستثمار العادية يؤدي تواجد قضبان الـFRP والفولاذ بشكل مشترك في التسليح إلى تحسين أداء الجوائز وتكون التكلفة الاقتصادية أقل من الاستخدام الوحيد لقضبان FRP، كما يحقق عمراً أطول للمنشآت إذا ما قورنت بحالة التسليح بقضبان فولاذية فقط.

قام الباحث (Tan 1997) [7] باختبار جوائز بيتونية مسلحة بشكل مشترك بقضبان أراميدية AFRP وقضبان فولاذية وقد ركزت دراسته على تغيير نسب التسليح وحدد نصيب قضبان الـAFRP من قدرة التحمل الكلية للقضبان عند الحالة الحدية، واستنتج أن النسبة المثالية لمساحة قضبان AFRP إلى إجمالي مساحة القضبان في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين تساوي (1/2).

اختبر الباحثان (Aiello و Ombres عام 2002) [8] مجموعة من الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين بقضبان فولاذية وأخرى من الـAFRP على الانعطاف، وقد أثبتت نتائجها التحليلية والتجريبية أن إضافة عدد مناسب من القضبان الفولاذية يؤدي إلى تحسين أداء الجوائز عند عملها تحت تأثير حملات استثمارية، وأنه عندما تزيد نسبة التسليح بالـAFRP عن النسبة التوازنية فإن مساهمة القضبان الفولاذية في قدرة التحمل الكلية للجوائز لا تزيد عن 15%.

اختبر الباحثان (Leung و Balendran عام 2003) [9] جوائز بيتونية مسلحة بشكل مشترك بقضبان فولاذية وأخرى زجاجية GFRP، وفيها تم وضع قضبان GFRP بالقرب من سطح الجوائز أما القضبان الفولاذية فوضعت في مستويات أعلى في المقطع واستنتج أن صلابة الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين تزداد بعد أن يحصل تطاول في القضبان الفولاذية وهذا يشير إلى أن قضبان GFRP تصبح أكثر فعالية، واستنتج أيضاً أن الجوائز المسلحة بشكل هجين ذات مقاومة أكبر على الانعطاف من الجوائز المسلحة بالفولاذ فقط، وأيضاً المسلحة فقط بقضبان من الـGFRP.

تم تنفيذ برنامج تجريبي في مخبر جامعة روستوف الحكومية للهندسة المدنية في روسيا خلال العام 2011-2012 م، وذلك في إطار التعاون العلمي بين جامعة تشرين - كلية الهندسة المدنية وجامعة روستوف، بهدف دراسة استخدام قضبان الـCFRP في تسليح الجوائز البيتونية، والعينات المدروسة في هذا البحث هي جزء من هذا البرنامج.

### أهمية البحث وأهدافه:

تعرض هذه المقالة النتائج التجريبية للجوائز المختبرة والتي تم فيها الاستعاضة عن القضبان الفولاذية المتوضعة على صف واحد بقضبان كربونية بشكل كلي أو جزئي بهدف البحث إلى ما يلي:

1- دراسة تأثير نسبة التسليح الهجين (فولاذ-كربون) على قدرات التحمل وأشكال الانهيار في الجوائز

المختبرة.

- 2- إجراء مقارنة لقيم السهوم في وسط المجاز لمعرفة فاعلية التسليح الهجين من ناحية التشوه.
- 3- دراسة تأثير التسليح الهجين على أشكال التشققات عرضها وانتشارها في الجوائز المختبرة.
- 4- مقارنة منحنيات (حمولة-تشوه في قضبان التسليح) و(حمولة- تشوه في البيتون المضغوط) للجوائز المختبرة.

### طرائق البحث ومواده :

اعتمد البحث على المنهجية التجريبية وذلك بتحضير واختبار مجموعة من العينات ضمن برنامج تجريبي وكانت المتغيرات فيها نسبة التسليح بالكربون واتخذت العينات المسلحة بالفولاذ كمعيار لمقارنة السلوك والنتائج المختلفة وذلك للتوصل إلى الاستنتاجات والتوصيات.

### البرنامج التجريبي والعينات المختبرة والمواد المستخدمة:

تم تحضير واختبار أربع مجموعات مكونة من 12 جاززاً بيتونياً مسلحاً بأبعاد كل منها (12.5\*25\*200 سم) ويبين الجدول (1) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة وكيفية تسليحها و تسميتها وتقسيمها إلى مجموعات، وتضم المجموعة الأولى (I) ثلاثة جوائز معيارية متماثلة كل منها مسلحة بثلاثة قضبان فولاذية 3Ø12 وتمت تسميتها (BS1,BS2,BS3)، وتضم المجموعة الثانية (II) ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة بثلاثة قضبان كربونية 3Ø12CFRP وتمت تسميتها (BC4,BC5,BC6)، أما المجموعة الثالثة (III) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيبين فولاذ 2Ø12 + قضيب كربون 1Ø12 وتمت تسميتها (Bh19, Bh20, Bh21)، والمجموعة الرابعة (IV) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيب فولاذ 1Ø12 + قضيبين كربون 2Ø12 وتمت تسميتها (Bh22, Bh23, Bh24).

الجدول (1) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة وكيفية تسميتها وتسليحها وتقسيمها إلى مجموعات

| رقم مجموعة الجوائز ونوعها المختبرة | اسم الجوائز في المجموعة | نوع وعدد وقطر ومساحة قضبان التسليح |                              | نسبة تسليح المقطع<br>$m = \frac{A_{s,c}}{b \cdot h_0}$<br>% | نسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية % | المقاومة المميزة للبيتون<br>$f'_c$ MPA |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|---|---|--|
|                                    |                         | كربونية CFRP                       | فولاذية                      |   |   |  |
| I<br>(معيارية تسليح بالفولاذ)      | BS1, BS2, BS3           | -                                  | 3Ø12<br>3.39 CM <sup>2</sup> | 1.21%   | 0   | 32.1                                   |
| II<br>(تسليح بالكربون)             | BC4, BC5, BC6           | 3Ø12<br>3.39 CM <sup>2</sup>       | -                            | 1.21%   | 100   | 33.7                                   |
| III<br>(تسليح هجين)                | Bh19, Bh20, Bh21        | 1Ø12<br>1.13 CM <sup>2</sup>       | 2Ø12<br>2.26 CM <sup>2</sup> | فولاذ=0.81%<br>كربون=0.4%                                   | 33.3  | 34.8                                   |
| IV<br>(تسليح هجين)                 | Bh22, Bh23, Bh24        | 2Ø12<br>2.26 CM <sup>2</sup>       | 1Ø12<br>1.13 CM <sup>2</sup> | فولاذ=0.4%<br>كربون=0.81%                                   | 66.6  | 34.1                                   |

ملاحظة: الحرف الأول B من اسم الجوائز مأخوذ من كلمة Beam ، والحرف الثاني يدل على نوع قضبان التسليح فـ S من كلمة Steel ، أما C من كلمة Carbon ، و h تعني تسليح هجين hybrid فولاذ وكربون ، والرقم الذي يلي ذلك يدل على تسلسل الجوائز ضمن مجموعته وضمن خطة البحث بشكل عام.

الجوائز المختبرة أعدت من البيتون وفق نسب الخلط المبينة في الجدول (2)، واستخدم الاسمنت البورتلاندي المصنع في معمل "بروليتاريا" في مدينة نوفاراسيسك الروسية، وهو من صنف (M500) وذو مقاومة على الضغط تساوي  $(500 \text{ Kg/Cm}^2)$  بعمر 28 يوماً. وهذا الصنف من الاسمنت متوفر في السوق المحلية بمدينة روستوف ويستخدم في المنشآت البيتونية المسلحة. أما البحص المستخدم فذو تدرج (10-25 ملم) والرمل كوارتزي ناعم، ولم يتم إضافة أية مواد أخرى إلى الخلطة البيتونية. ولتحديد مقاومة البيتون على الضغط تم صب 3 مكعبات  $(15*15*15 \text{ سم})$  من بيتون كل مجموعة جوائز، ويبين الجدول (1) قيم المقاومة المميزة للبيتون  $f_c'$  في الجوائز المختبرة. وعملية تصلب البيتون تمت في ظروف طبيعية في مخبر البيتون المسلح لدى جامعة روستوف الروسية و كانت الحرارة بحدود  $(20\text{C}^0)$ .

الجدول (2) النسب الوزنية لمواد الخلطة البيتونية في المتر المكعب

| المادة     | الإسمنت | البحص | الرمل | الماء |
|------------|---------|-------|-------|-------|
| الوزن (Kg) | 450     | 1270  | 460   | 207   |

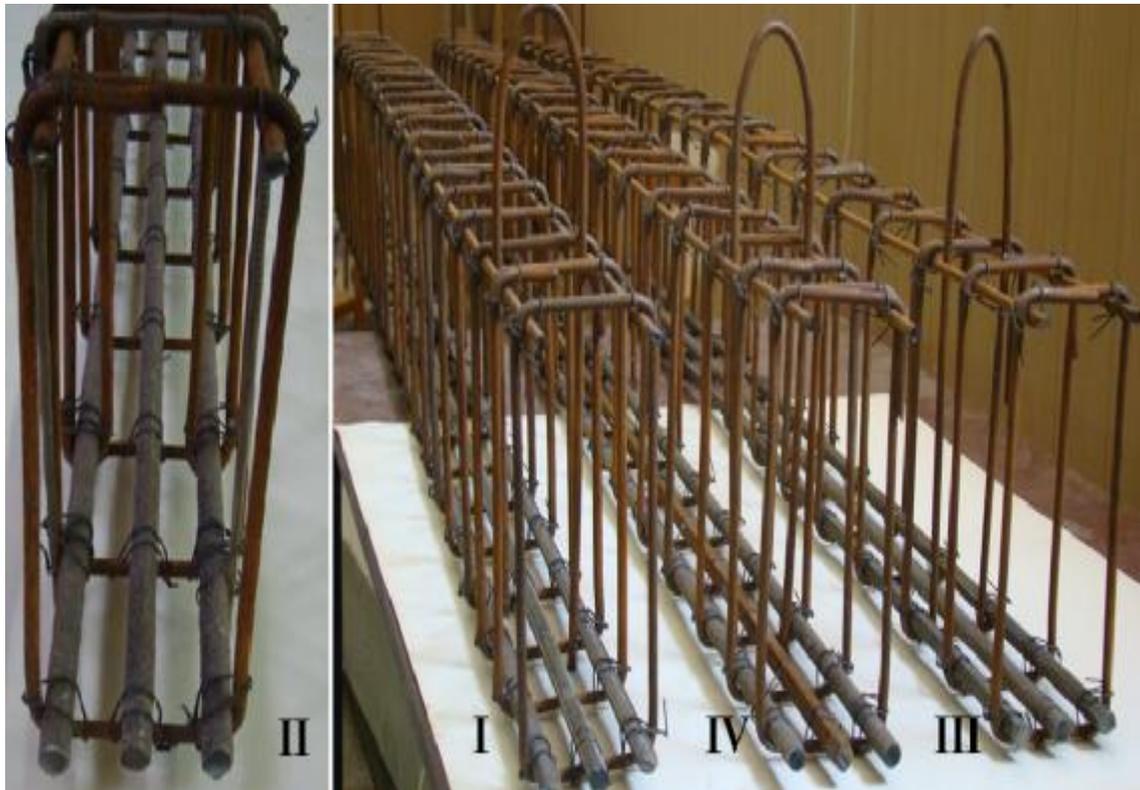
تم استخدام قضبان فولاذية ملساء للتسليح العرضي والعلوي بقطر 6 ملم من نوع B500 ، أما التسليح السفلي فاستخدمت قضبان فولاذية محلزنة بقطر 12 ملم من نوع A600 روسية الصنع وكذلك قضبان كربونية CFRP محلزنة ومكسوة بالرمل بقطر 12 ملم وهي أمريكية الصنع . ويبين الجدول (3) الخصائص الميكانيكية لقضبان التسليح المستخدمة في البحث، أما الشكل (1) فيظهر صور هذا القضبان، ويبين الشكل (2) صور لهياكل التسليح في الجوائز المختبرة.

الجدول (3) مواصفات قضبان التسليح الفولاذية والكربونية المستخدمة في تسليح الجوائز المختبرة

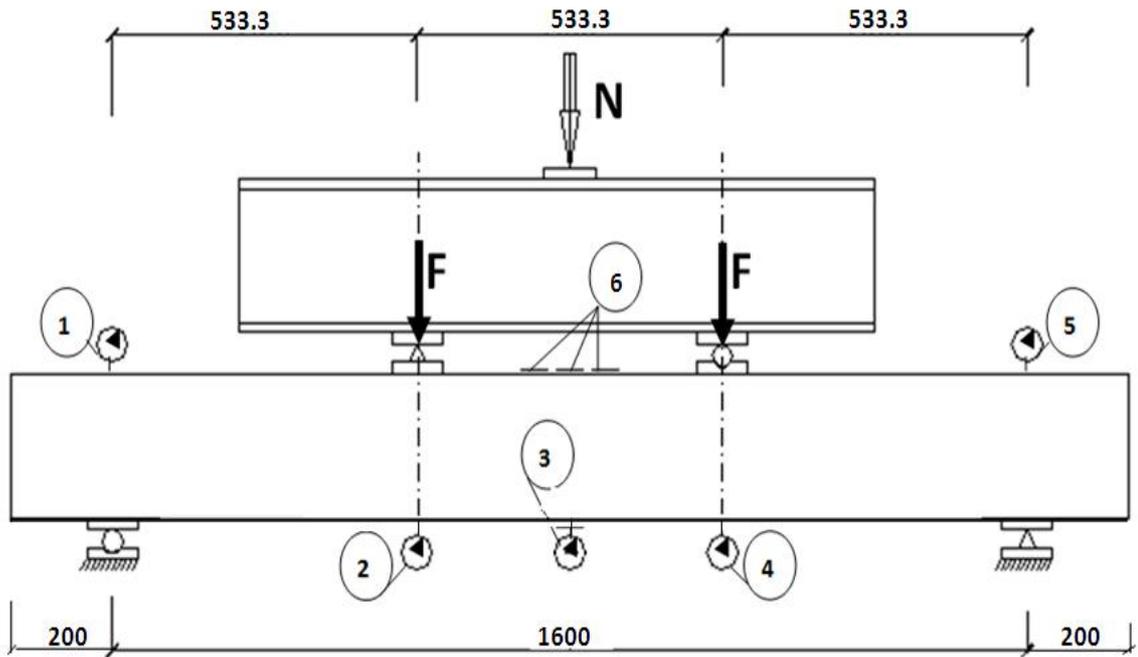
| معامل المرونة GPa | إجهاد الخضوع MPa | المقاومة على الشد MPa | القطر Ø (mm) | نوع قضبان التسليح                                       |
|-------------------|------------------|-----------------------|--------------|---|
| 200               | 497              | 608                   | 6            | قضبان فولاذية ملساء للتسليح العرضي والتسليح العلوي B500 |
| 200               | 622              | 700                   | 12           | قضبان فولاذية محلزنة للتسليح السفلي A600                |
| 75                | -                | 2300                  | 12           | قضبان كربونية محلزنة ومكسوة بالرمل للتسليح السفلي CFRP  |



الشكل (1) شكل قضبان التسليح الكربونية CFRP والفولاذية المستخدمة في تسليح الجوائز المختبرة.



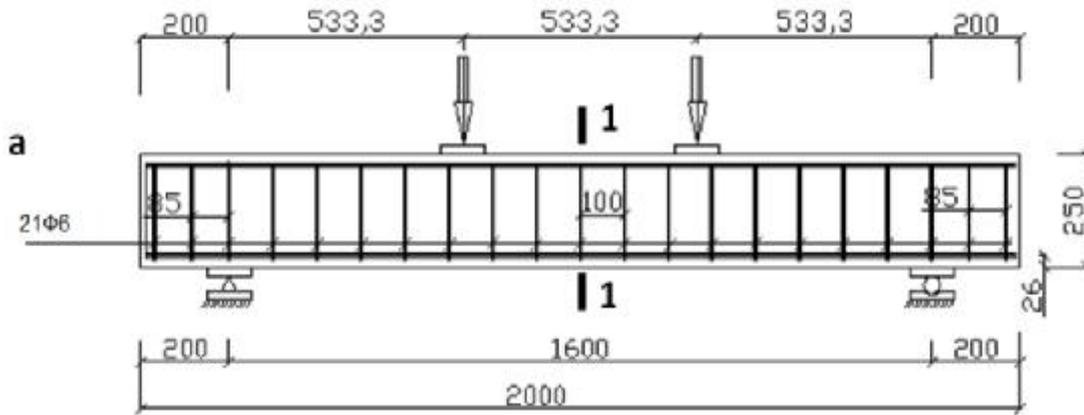
الشكل (2) شكل هياكل التسليح لمجموعات الجوائز المختبرة I- II- III- IV.

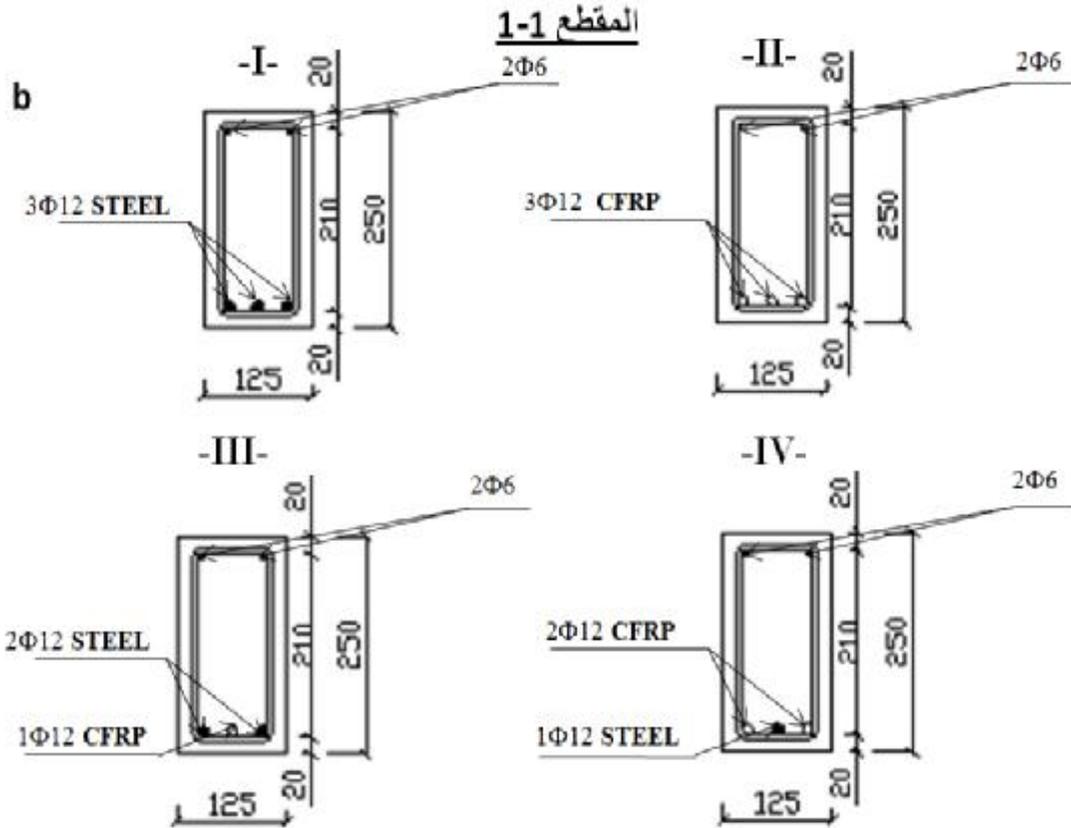


الشكل (3) مخطط عام للجوائز المختبرة يبين مكان توضع مقاييس التشوه والحساسات وموزع الحمولة وكيفية الاستناد. 1- 2- 3- 4- 5 مقاييس انتقال ساعية، 6 - مكان لصق حساسات التشوه على السطح البيتوني في منتصف منطقة الضغط، (الأبعاد بـ ملم).

يبين الشكل (4) الأبعاد الهندسية وشكل ونوع التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة وفق المجموعات

. IV- III-II-I





الشكل (4) الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة. a- مقطع طولي، b- مقطع عرضي للجوائز المختبرة وفق المجموعات I-II-III-IV، (الأبعاد بـ ملم).

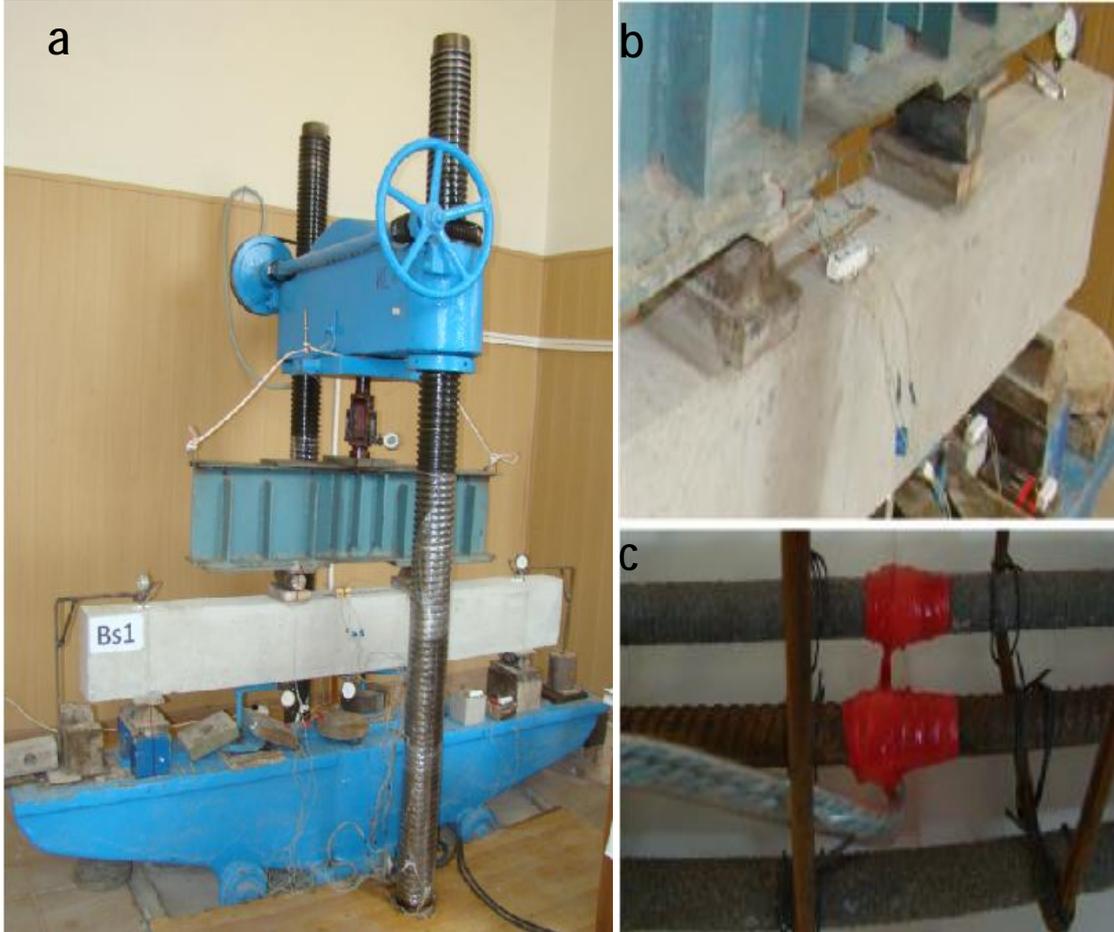
### الإجراءات المتعلقة بالتجارب:

اختبرت الجوائز بعمر 10-11 شهر كجوائز بسيطة الاستناد تحت تأثير حملتين مركزيتين تتوضع كل منهما على ثلث طول مجاز الجوائز المساوي (160cm) الشكل(3)، وتم التحميل بشكل تدريجي باستخدام جهاز تحميل هيدروليكي عن طريق خلية تحميل (ديناموميتر) ذات استطاعة 500 KN توضع بين المكبس الهيدروليكي وموزع الحمولة كما في الشكل (5-a) وبدفعات تحميل متزايدة (4 و 8 و 16 KN) وبعد كل دفعة تحميل كانت فترة انتظار تساوي 10 دقائق، حيث أخذت القراءات مرتين بعد التحميل مباشرة ثم بعد فترة الانتظار واعتمد أخيراً متوسط القراءتين.

تم التحميل في المرحلة الأولى بثلاث دفعات تحميل كل منها 4KN تلا ذلك التحميل بدفعات 8KN وبعد ذلك بدفعات 16KN إلى مستوى تحميل يساوي 80% من الحمولة القصوى بعد ذلك تم التحميل بدفعات 8KN حتى حصول انهيار الجوائز.

كما استخدمت حساسات التشوه بطول 50mm لرصد التشوه الحاصل في البيتون المضغوط وحساسات تشوه بطول 10 mm لرصد التشوهات الحاصلة في قضبان التسليح كما مبين في الشكل (5-b-c)، ووصلت الحساسات جميعها إلى محطة قياس التشوهات.

قيست السهوم والانتقالات في الجوائز المختبرة باستخدام ساعات قياس السهوم وعددها خمسة كما في الشكل (5) وضعت اثنتان على محوري الاستناد فوق الجائز واثنتان على محوري التحميل تحت الجائز وواحدة وضعت تحت منتصف مجاز الجائز .  
تم تحديد التشققات الحاصلة وانتشارها وعرضها عند كل مستوى تحميل ، كما سجلت قيم السهوم والتشوهات و الحمولات الموافقة لها .



الشكل (5): a- شكل جهاز التحميل المستخدم في اختبار الجوائز في جامعة روستوف الحكومية في روسيا، b- لصق حساسات التشوه على البيتون في منطقة الضغط، c- لصق حساسات التشوه على قضبان التسليح وتوصيلها بالأسلاك وعزلها قبل الصب

### النتائج والمناقشة:

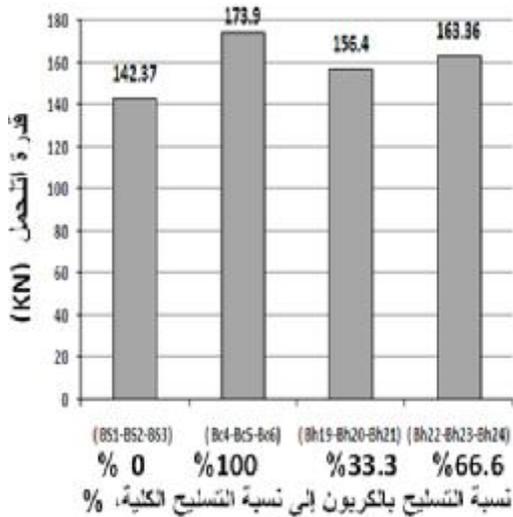
أثناء اختبار العينات تم تسجيل العديد من النتائج و سننظر في بحثنا هذا إلى مقارنة ومناقشة النتائج المتعلقة بمقاومة الجوائز على الانعطاف وقيم السهوم وأشكال التشققات وعرضها وقيم التشوهات في القضبان والبيتون المضغوط.

### مقاومة الجوائز على الانعطاف:

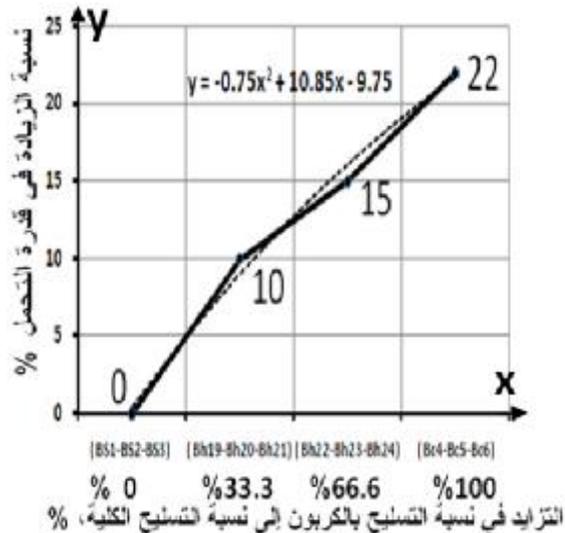
إن الحمولات المسببة لانتهيار الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ أو الكربون أو الاثنتين معاً (تسليح هجين) مبين في الجدول (4) ومن خلال إجراء مقارنة مباشرة للنتائج التجريبية تبين أن نوع قضبان التسليح ذو تأثير كبير

على قدرة التحميل الأعظمية للجوائز ، فعلى الرغم من أن قضبان التسليح الكربونية المستخدمة في الجوائز ذات قدرة تحمل على الشد أكبر بحوالي أربع مرات من القضبان الفولاذية فان قدرة تحمل الجوائز المسلحة بها أكبر بـ 22% فقط من الجوائز المسلحة بالفولاذ . وقدرة تحمل الجوائز المسلحة تسليحاً هجيناً تتعلق بنسبة التسليح بقضبان كربونية، فالجوائز المسلحة بقضيب أو بقضيبين كربون في مقطعها ازدادت قدرة تحملها القصوى بنسبة (10 و 15) % بالتتالي، مقارنة مع الجوائز المسلحة بالفولاذ.

ويبين الشكل (6) أن ازدياد نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المختبرة وفق النسب التالية (0-33.3-66.6-100)% تؤدي إلى زيادة قدرة التحمل بشكل طردي بالتتالي وفق النسب التالية: (0-10-15-22) % . كما يظهر الشكل (6) العلاقة الرياضية التقريبية التي تربط ازدياد قدرة التحمل الأعظمية بازدياد نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المسلحة بشكل هجين. ويوضح الجدول (4) أشكال الانهيار الحاصلة في الجوائز المختبرة، والتي يظهر منها أن جميع الجوائز البيتونية المعيارية المسلحة بالفولاذ انهارت نتيجة تطاول قضبان التسليح الطولية، أما الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون فانهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط. وجميع الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين (فولاذ- CFRP) انهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط في منطقة الضغط ورافقه حصول تطاول في قضبان التسليح.



-a-



-b-

الشكل (6) العلاقة بين قدرة تحمل الجوائز ونسبة التسليح بالكربون. a- تغير قدرة تحمل الجوائز مع تغير (نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية). b - منحنى تزايد قدرة التحمل (y) مع تزايد (نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية) (x).

الجدول (4) مقارنة قدرات التحمل الأعظمية للجوائز المختبرة وأشكال انهيارها

| شكل الانهيار في الجوائز                           | نسبة الزيادة في قدرة التحمل بالنسبة للجوائز المعيارية ( المسلحة بالفولاذ) % | قدرة التحمل القصوى $N_{max}^{exp}$ (KN) |              | اسم الجائز | مجموعة الجوائز المختبرة |
|---|---|---|--------------|------------|-------------------------|
|   |   | قيمة وسطية                              | قيمة تجريبية |            |                         |
| تطاول قضبان التسليح الطولية                       | 0   | 142.37                                  | 145.5        | BS1        | I                       |
| تطاول قضبان التسليح الطولية                       |   |   | 142.2        | BS2        |                         |
| تطاول قضبان التسليح الطولية                       |   |   | 139.43       | BS3        |                         |
| تحطم البيتون المضغوط                              | 22  | 173.9                                   | 173.5        | BC4        | II                      |
| تحطم البيتون المضغوط                              |   |   | 174          | BC5        |                         |
| تحطم البيتون المضغوط                              |   |   | 176          | BC6        |                         |
| تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الطولية | 10  | 156.4                                   | 155.4        | Bh19       | III                     |
| تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الطولية |   |   | 155.8        | Bh20       |                         |
| تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الطولية |   |   | 158          | Bh21       |                         |
| تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الطولية | 15  | 163.36                                  | 163.9        | Bh22       | IV                      |
| تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الطولية |   |   | 162          | Bh23       |                         |
| تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الطولية |   |   | 164.2        | Bh24       |                         |

## مقارنة قيم السهوم وسط الجوائز المختبرة:

يبين الجدول (5) مقارنة قيم السهوم الأعظمية في وسط المجاز للجوائز المختبرة ، ويظهر على الشكل (7) مقارنة بين منحنيات (حمولة - سهم) في وسط مجاز الجوائز المختبرة ، حيث رسم مخطط (حمولة - سهم) الناتج عن قيمة السهم الوسطية الناتجة من ثلاثة جوائز في كل مجموعة. ومنها نستنتج أن الجزء الخطي الأول من المنحنيات كان متشابهاً تقريباً (حتى حمولة 40 KN) لجميع الجوائز وفي نهاية المرحلة الخطية الأولى، بدأت الجوائز بالتشقق وفي الجزء الثاني من المنحنيات كانت هناك ميول مختلفة للمنحنيات تختلف عن الميل في الجزء الأول، وهذا يشير إلى أن صلابة الجوائز انخفضت بعد التشقق، غير أن التناقص في الصلابة كان مختلفاً وتبعاً لنوع التسليح المستخدم.

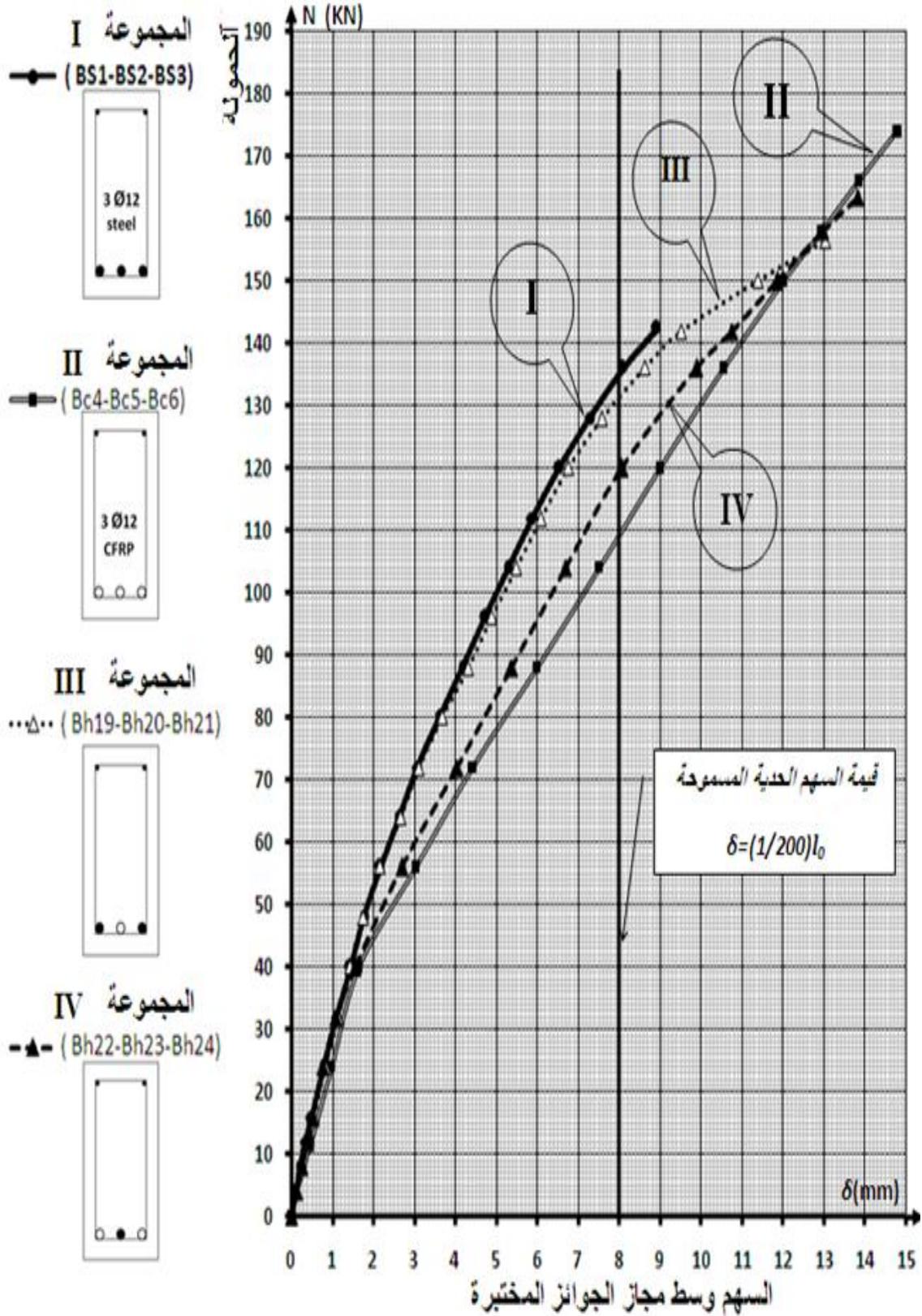
ومن الشكل (7) يتبين أن السهوم في الجوائز المسلحة بقضبان كربونية تزداد بعد تشكل الشقوق الشاقولية وأن درجة ميلان المنحني تزداد مع ازدياد عدد قضبان الكربون في المقطع، ففي جوائز المجموعة الثانية II

(BC4,BC5,BC6) حيث التسليح بالكربون بنسبة 100% كانت درجة الميلان أعظمية ويتخذ المنحني شكلاً خطياً مستقيماً إلى لحظة الانهيار، (وهذا ناتج عن العلاقة الخطية بين الإجهاد والتشوه في قضبان التسليح الكربونية).  
 فيجوائز المجموعتين III و IV (Bh19,Bh20,Bh21 و Bh22,Bh23,Bh24) المسلحة بشكل هجين (فولاذ - CFRP) يحدث ميل خفيف في نهاية الجزء الثاني من منحنيات (حمولة - سهم)، ويفسر هذا كنتيجة لحصول تطاول في فولاذ التسليح وتحطم في البيتون المضغوط ، وتميل هذه المنحنيات في جزئها الأخير لتتلاقى مع منحني (حمولة - سهم) الخاص بالجوائز المسلحة بالكربون بشكل كامل.

الجدول (5) مقارنة قيم السهوم الأعظمية في وسط المجاز للجوائز المختبرة ومتوسط عدد الشقوق في منطقة الانعطاف الصافي

| متوسط المسافة بين الشقوق<br>CM | متوسط ارتفاع الشقوق في منطقة الانعطاف الصافي<br>CM | نسبة الزيادة في قيمة السهم بالنسبة للجوائز المعيارية ( المسلحة بالفولاذ) % | قيمة السهم في وسط المجاز<br>$d_{max}^{exp}$ (mm) |              | أسم الجوائز | مجموعة الجوائز المختبرة |
|--------------------------------|--|--|--|--------------|-------------|-------------------------|
|                                |  |  | قيمة وسطية                                       | قيمة تجريبية |             |                         |
| 8.9                            | 17.5   | 0  | 8.92   | 8.65         | BS1         | I                       |
|                                |  |  |  | 9.22         | BS2         |                         |
|                                |  |  |  | 8.89         | BS3         |                         |
| 4.4                            | 17.7   | 66   | 14.78  | 14.4         | BC4         | II                      |
|                                |  |  |  | 14.75        | BC5         |                         |
|                                |  |  |  | 15.2         | BC6         |                         |
| 6.7                            | 21   | 46   | 13.01  | 12.4         | Bh19        | III                     |
|                                |  |  |  | 12.94        | Bh20        |                         |
|                                |  |  |  | 13.7         | Bh21        |                         |
| 5.3                            | 17.4   | 55   | 13.81  | 13.3         | Bh22        | IV                      |
|                                |  |  |  | 13.89        | Bh23        |                         |
|                                |  |  |  | 14.28        | Bh24        |                         |

ملاحظة: تم إحصاء عدد الشقوق الشاقولية في منطقة الانعطاف الصافي وضمن مجال يساوي 53.3 سم، وأخذ متوسط ارتفاع الشقوق في ثلاثة جوائز لكل مجموعة. ويجب الإشارة إلى أن الشقوق تختلف في طولها وشكلها تبعاً للتسليح، وللحصول على متوسط المسافة بين الشقوق تم تقسيم المجال 53.3 سم على عدد الشقوق.

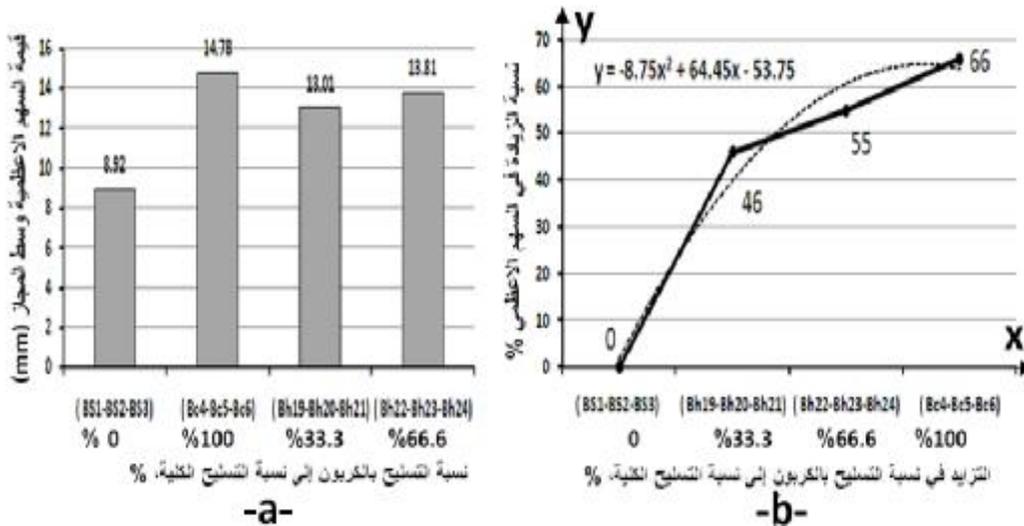


الشكل (7) منحنيات (حمولة - سهم) لمجموعات الجوائز المختبرة I- II- III- IV وهي مأخوذة كقيمة متوسطة لثلاث جوائز في كل مجموعة

يبين الشكل (8-b-a) أن ازدياد نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المختبرة وفق النسب التالية: (0-33.3-66.6-100)%، يؤدي إلى زيادة قيمة السهم الأعظمي وفق النسب التالية: (0-46-55-66)% بالتالي. كما يظهر الشكل (8-b) العلاقة الرياضية التقريبية التي تربط ازدياد قيمة السهم الأعظمي بازدياد نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المسلحة بشكل هجين.

ولتحليل النتائج المتعلقة بالسهم لا بد من الأخذ بالحسبان الحدود القصوى المسموحة للسهم وسط المجاز وهي تساوي  $d = (\frac{1}{200})l_0$  حسب الكود الروسي [10]، وهذه القيمة تساوي 8 ملم في عينات البحث، وعند مقارنة الحملات المسببة لهذا السهم (8 ملم) على منحنيات (حمولة - سهم) والمبينة في الشكل (7)، نلاحظ أن الجوائز المسلحة بالكامل بالكربون يصل السهم الحدي إلى هذه القيمة عند الحمولة (109 KN) أما الجوائز المسلحة بنسبة 66.6% بقضبان كربونية فيصل السهم الحدي إلى هذه القيمة عند الحمولة (119 KN)، وأخيراً الجوائز المسلحة بقضبان كربونية بنسبة 33.3%، فيصل فيها السهم الحدي إلى هذه القيمة عند الحمولة (131 KN)، أما في الجوائز المعيارية فيصل فيها السهم الحدي إلى هذه القيمة عند الحمولة (135KN).

من الشكل (7) نلاحظ أيضاً أن الجوائز المسلحة بالكربون بنسبة 33.3% (قضيب واحد كربوني) من مساحة التسليح الكلية، يكون السهم فيها أكبر من السهم في الجوائز المسلحة كلياً بالفولاذ على كامل مجال التحميل.

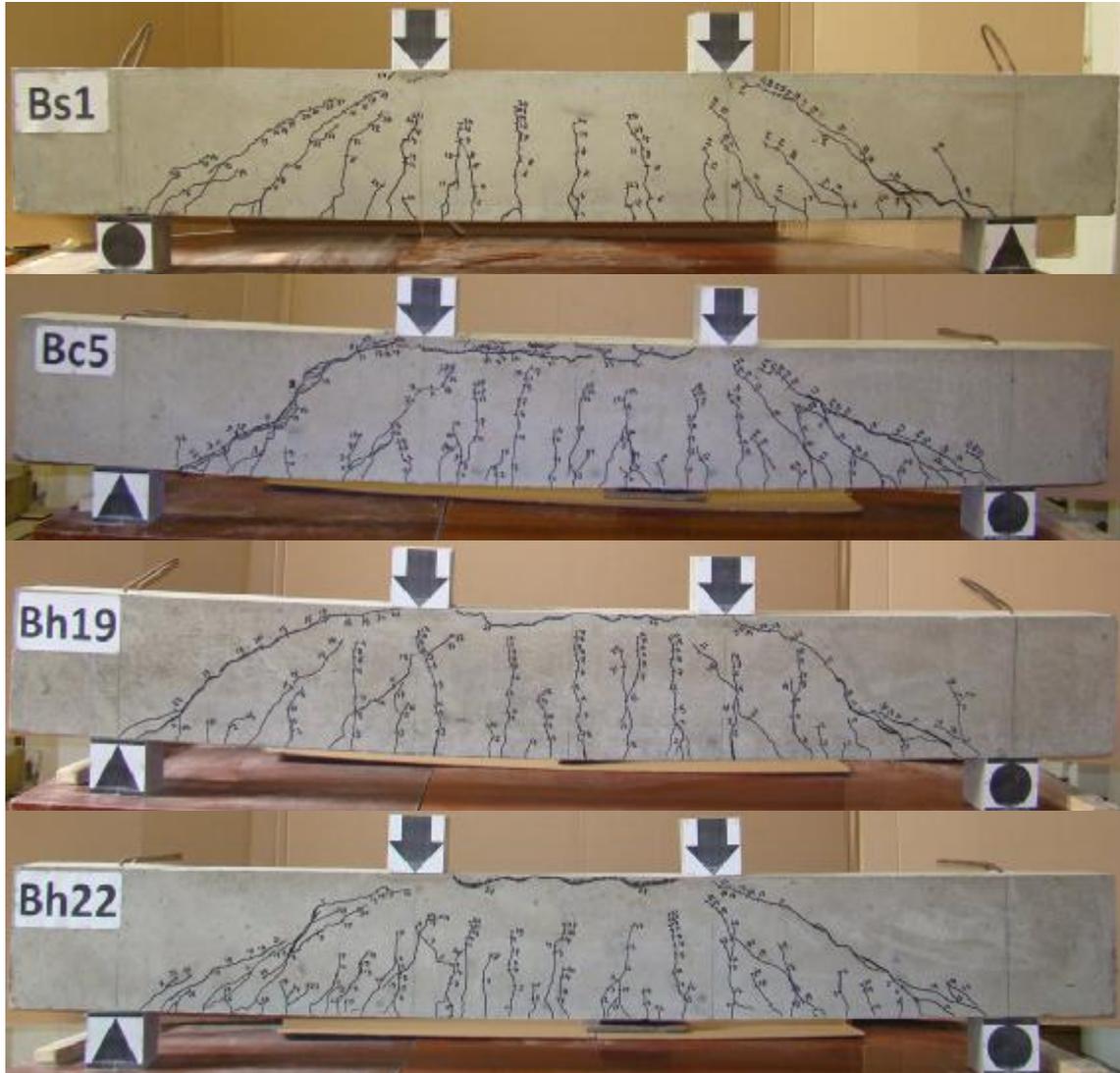


الشكل (8) العلاقة بين قيمة السهم الأعظمي وسط المجاز وتغير نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المختبرة. a- تغير قيمة السهم الأعظمي وسط المجاز مع تغير (نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية). b- تزايد قيمة السهم الأعظمي (y) مع تزايد (نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية) (x).

### مقارنة شكل التشققات وانتشارها وعرضها في الجوائز المختبرة:

يبين الشكل (9) أشكال التشققات وتوزعها في أربع جوائز (حيث تم اختيار جائز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة I-II-III-IV)، ويتبين منها أن عدد الشقوق يزداد مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية. ونلاحظ أن المسافة بين التشققات تتناقص مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية، وعند رصد منطقة الانعطاف الصافي بطول 53.3 سم، يتبين أن متوسط عدد الشقوق يزداد من 7 شقوق في الجوائز المعيارية إلى 9

شقوق في الجوائز التي يحوي تسليحها قضيب كربوني واحد، والى 11 شق في الجوائز التي يحوي تسليحها قضيبين كربون ، ثم إلى 13 شق في الجوائز التي يحوي تسليحها ثلاثة قضبان كربون.

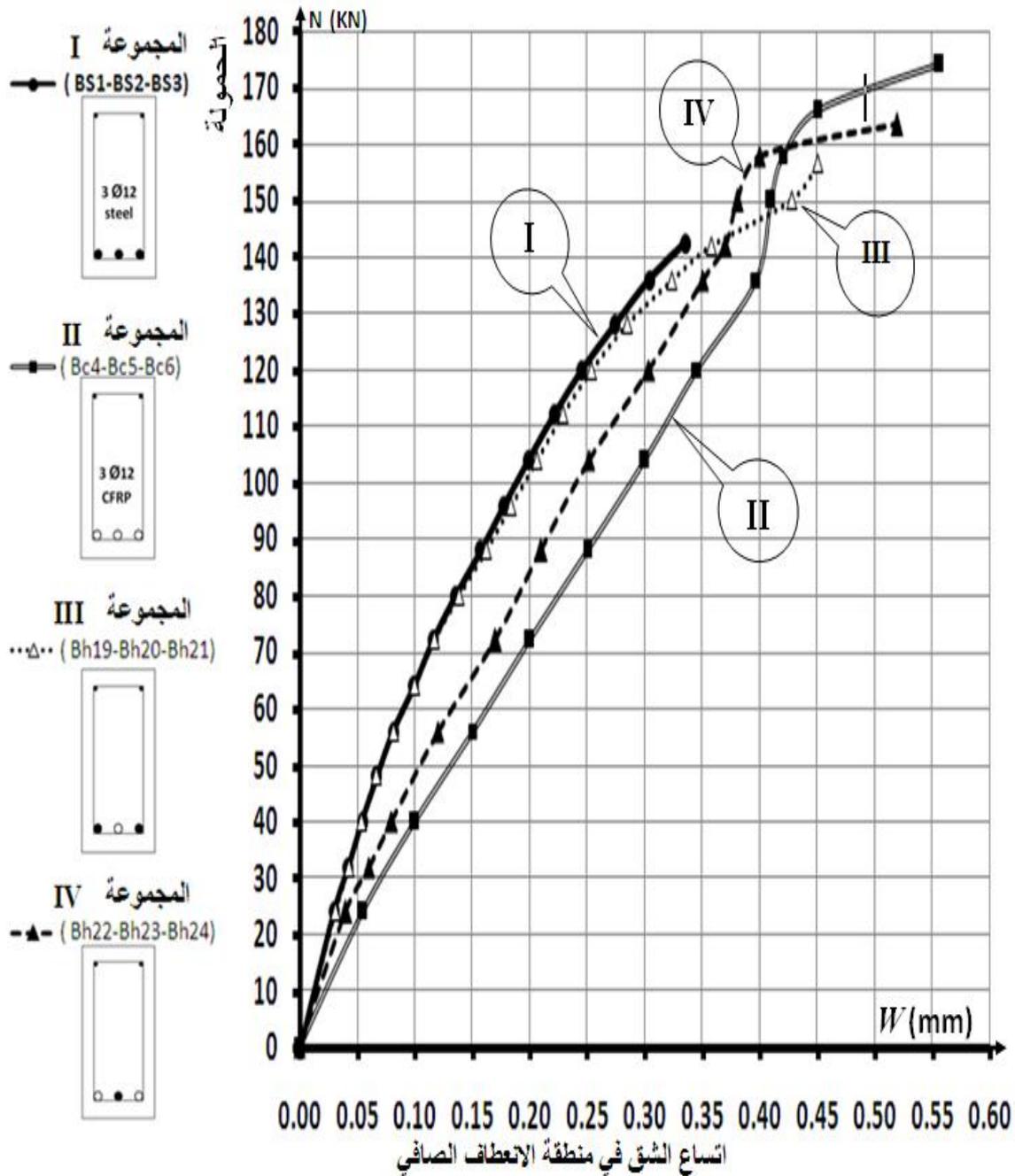


الشكل (9) أشكال التشققات وانتشارها في الجوائز المختبرة حيث تم اختيار جائز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة ((BS1, BS2, BS3):I) ، ((BC4, BC5, BC6):II) ، ((Bh19, Bh20, Bh21):III) ، ((Bh22, Bh23, Bh24):IV)

ونلاحظ من الجدول (5) أن متوسط المسافة بين الشقوق تتناقص من 8.9cm في جوائز المجموعة (I) إلى 6.7cm في جوائز المجموعة (III)، ثم إلى 5.3cm في جوائز المجموعة (IV) والى 4.4cm في جوائز المجموعة (II)، وتجدر الإشارة إلى أن التشققات في الجوائز المسلحة بقضبان كربونية بشكل كلي أو جزئي تغلق بعد إزالة الحمولة عنها بشكل كامل نظراً للمرونة العالية للقضبان الكربونية.

ومن الشكل (10) نلاحظ على الجزء الأول من المنحنيات أن اتساع الشق في جوائز المجموعة (II) المسلحة بنسبة 100% كربون من مساحة تسليحها هو الأكبر، ثم تليها جوائز المجموعة (IV) المسلحة بنسبة

تسليحها. 66.6% كربون من مساحة تسليحها ، ويلي ذلك جوائز المجموعة (III) المسلحة بنسبة 33.3% كربون من مساحة



الشكل (10) منحنيات (حمولة - اتساع الشق) لمجموعات الجوائز المختبرة I- II- III- IV وهي مأخوذة كمتوسط القيمة لثلاث جوائز في كل مجموعة

أما في جوائز المجموعة المعيارية (I) فانتساع الشق كان الأصغر على كامل مجال التحميل. وفي جوائز المجموعتين (II) و (III) و (IV) نلاحظ على الجزء الأخير من منحنياتها توقف أو تباطؤ في اتساع الشقوق وذلك بسبب تشكل الشقوق المائلة واتساعها على حساب الشقوق الشاقولية.

## مقارنة قيم التشوه الحاصلة في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز المختبرة:

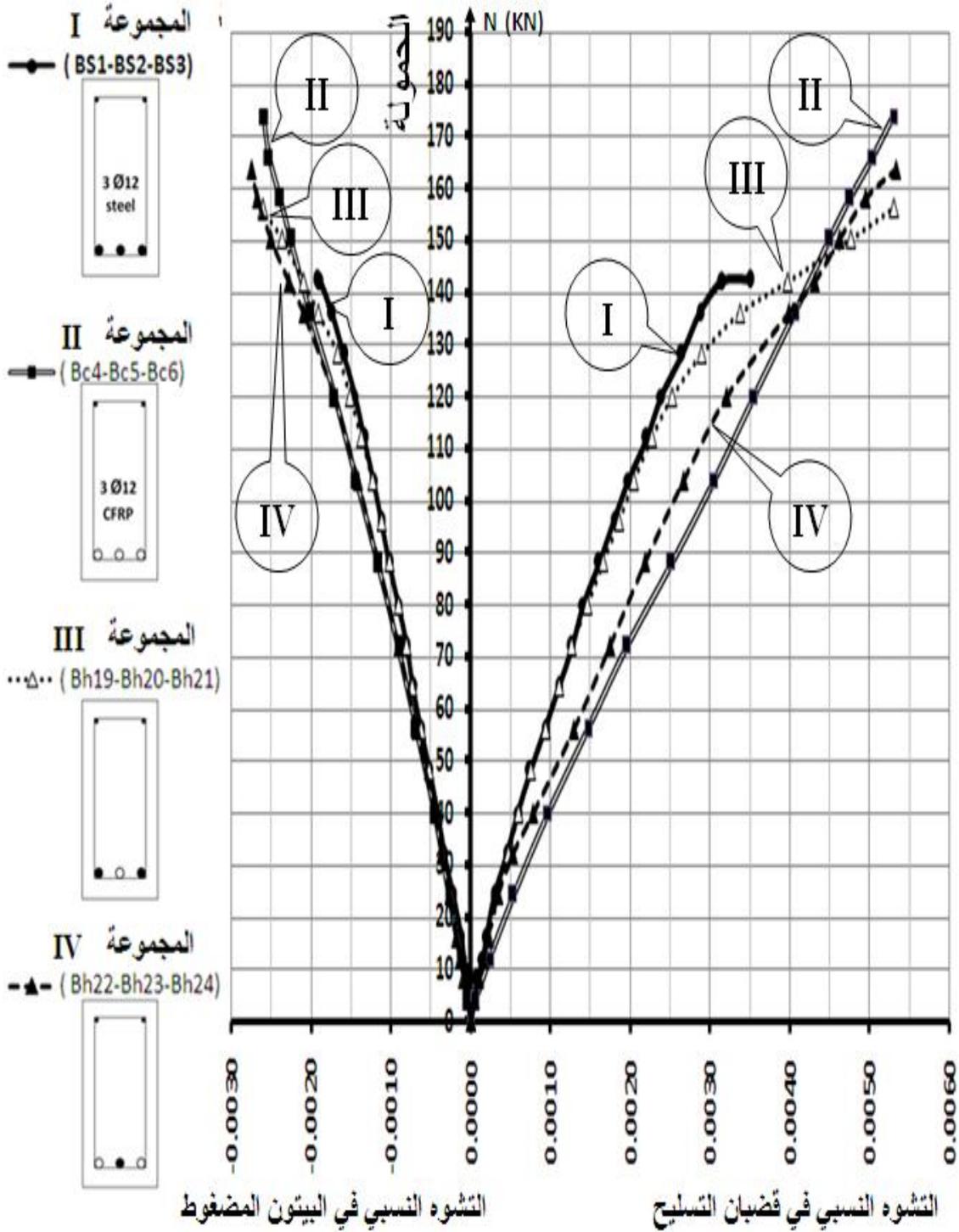
كما ذكر سابقاً فقد لصقت في منتصف الجائز وعلى السطح البيتوني العلوي حساسات تشوه خارجية وكذلك حساسات تشوه داخلية على قضبان التسليح ووصلت جميعها إلى محطة قياس التشوهات، التي سجلت قيم التشوهات النسبية الحاصلة بعد كل دفعة تحميل، ويبين الجدول (6) مقارنة قيم التشوهات الحدية في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز المختبرة، ومنه يتبين أن البيتون المضغوط في مجموعة الجوائز II وIII وIV تحطم بعد أن تجاوزت قيمة التشوه النسبي القيمة (0.00259)، في حين أن التشوه النسبي في الجوائز المعيارية لم يتجاوز القيمة (0.00193) وبالتالي لم يحصل تحطم للبيتون فيها. ومن نفس الجدول يتبين أن قيمة التشوه النسبي في قضبان تسليح المجموعات II وIII وIV يساوي (0.0053 - 0.0051 - 0.0052) بالتتالي، ولكن عند حمولات مختلفة، أما في قضبان المجموعة المعيارية I يكون أقل وتساوي قيمته (0.0035).

الجدول (6) مقارنة قيم التشوهات الحدية في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز المختبرة

| متوسط قيمة التشوه النسبي الحدية لحظة الانهيار |  | رقم مجموعة الجوائز المختبرة ونوعها |
|---|--|------------------------------------|
| في البيتون المضغوط                            | في قضبان التسليح   |                                    |
| - 0.00193                                     | 0.0035   | I (معيارية تسليح بالفولاذ)         |
| - 0.00259                                     | 0.0053   | II (تسليح بالكربون)                |
| - 0.00261                                     | في قضبان الكربون = 0.0051<br>في قضبان الفولاذ = 0.0036 عند الحمولة (128KN) | III (تسليح هجين)                   |
| - 0.00275                                     | في قضبان الكربون = 0.0052<br>في قضبان الفولاذ = 0.004 عند الحمولة (136KN)  | IV (تسليح هجين)                    |

وتجدر الإشارة إلى أنه في جوائز المجموعتين III وIV كانت قيمة التشوه النسبي في القضبان الكربونية أكبر مما هي عليه في القضبان الفولاذية بحدود 2.6 % و 6.4 % بالتتالي، إلى أن يبلغ الفولاذ مرحلة اللدونة، ثم يصبح الفولاذ أكثر تشوهاً إلى لحظة الانهيار. وتوقفت الحساسات المصوقة على القضبان الفولاذية عن إعطاء قيم التشوه بحدود القيمة 0.0036.

وتظهر على الشكل (11) مقارنة لمنحنيات (حمولة - تشوه) في قضبان التسليح و(حمولة - تشوه) في البيتون المضغوط لمجموعات الجوائز المختبرة I- II- III- IV، ومنها نستنتج أن التشوهات النسبية الحاصلة في القضبان تكون أكبر من التشوهات النسبية الحاصلة في البيتون عند الحمولة نفسها. كما أن القضبان الكربونية تتشوه بشكل خطي إلى لحظة حصول الانهيار.



الشكل (11) مقارنة بين منحنيات (حمولة - تشوه) في قضبان التسليح و(حمولة - تشوه) في البيتون المضغوط لمجموعات الجوائز المختبرة I - II - III - IV وهي مأخوذة كمتوسط القيمة لثلاث جوائز في كل مجموعة

### الاستنتاجات والتوصيات:

عند إجراء مقارنة مباشرة لقيم التحمل الأعظمية وقيم السهوم وشكل التشققات وانتشارها وعرضها في الجوائز المختبرة والمسلحة وفق نسب تسليح مختلفة من قضبان الفولاذ والكرتون يمكن كتابة النتائج التالية:

- 1- إضافة قضبان كربونية إلى جانب القضبان الفولاذية في تسليح مقاطع العناصر البيتونية يؤدي إلى زيادة قدرات تحملها، غير أنها تصبح أكثر تشوها (سهوم أكبر وعدد تشققات أكثر) بالمقارنة مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ فقط.
- 2- عندما تزداد نسبة التسليح بقضبان كربونية في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين وفق النسب التالية: (0 - 10 - 15 - 22)% بالتتالي.
- 3- حصل انهيار الجوائز البيتونية في المجموعة الأولى (I) المسلحة بالفولاذ نتيجة تطاول فولاذ التسليح، أما جوائز المجموعة الثانية (II) المسلحة بالكربون بشكل كلي فانهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط. أما جوائز المجموعتين (III-IV) المسلحة بالكربون بشكل جزئي، انهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح.
- 4- إن إضافة قضبان كربونية إلى جانب القضبان الفولاذية في تسليح مقاطع العناصر البيتونية يؤدي إلى زيادة قيم السهم في وسط المجاز.
- 5- عندما تزداد نسبة التسليح بقضبان كربونية في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين وفق النسب التالية: (0 - 33.3 - 66.6 - 100)% ، تزداد قيم السهم وفق النسب (0 - 46 - 55 - 66)% بالتتالي.
- 6- يؤدي الاستخدام المشترك للقضبان الكربونية والفولاذية في تسليح الجوائز البيتونية إلى زيادة ملحوظة في عدد التشققات وتناقص للمسافة بينها ، وذلك بالمقارنة مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ فقط.
- 7- يزداد اتساع الشقوق الشاقولية مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية وذلك إلى حين تشكل الشقوق المائلة في الجوائز المختبرة.
- 8- تزداد قيمة التشوه النسبي في قضبان التسليح والبيتون المضغوط مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية، وانهارت الجوائز التي تجاوز التشوه النسبي في بيتونها القيمة (0.00259) نتيجة تحطم البيتون المضغوط فيها.

## المراجع:

- [1] – HOUSSAM, A.T.;MOHAMED,S.*Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars*.ACI Structure Journal,U.S.A., Vol.97, №5, 2000.712-719.
- [2] - ABDALLA, H.A.*Evaluation of Deflection in Concrete Members Reinforced with Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars*.Composite Structures, U.S.A., Vol. 6,2002.63-71.
- [3] - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE.ACI, *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*. ACI 440.1R-06, Detroit. 2006.
- [4] - TOUTANJI, H. A. ;SAAFI, M. *Deflection and Crack Width Predictions of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars*. Proceedings, Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures.U.S.A. 1999.712-719.
- [5] - MOHAMMAD, M.R.;ALI,N.;FARIS,A.; DIDIER,T.*Aspects of Behaviour of CFRP Reinforced Concrete Beams in Bending*. Construction and Building materials, U.S.A., Vol.22. 2008.277-285.
- [6] -SAIKIA,B.*Strength and Serviceability Performance of Beams Reinforced with GFRP Bars in Flexure*.Construction and Building Materials, U.S.A., Vol. 21, № 9, 2006.1709-1719.
- [7] - TAN, K. H. *Behaviour of hybrid FRP-steel reinforced concrete beams*. Proc., 3rd Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Japan Concrete Institute, Sapporo, 1997. 487–494.
- [8] - AIELLO, M. A.;OMBRES, L. *Structural performances of concrete beams with hybrid -fiber-reinforced polymer-steel- reinforcements*. J. Compos. Constr., U.S.A.,VOL. 6. № 2,2002. 133–140.
- [9] -LEUNG, H. Y.;BALENDRAN, R. V. *Flexural behaviour of concrete beams internally reinforced with GFRP rods and steel rebars*. J. Struct. Surv., U.S.A., VOL.21. № 4, 2003. 146–157.
- [10]-СП 52-101.*Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры*.Москва.2003.