# سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين بقضبان فولاذية وأخرى من الألياف الزجاجية (GFRP)– دراسة تجريبية

**الدكتور: أحمد محمود ميهوب***

**الدكتورة: ميرفت حسن حشمه****

**□ الملخص□**

استخدمت في هذا البحث قضبان فولاذية وأخرى من الألياف الزجاجية (GFRP) في تسليح ستة جوائز بيتونية، وعلى الرغم من أن الاختلاف بين هذين النوعين من القضبان من ناحية المقاومة على الشد ومعامل المرونة والاختلاف بالوزن وقابلية الصدأ والتمايز في التماسك مع البيتون جعلت سلوك هذه الجوائز يختلف عن الجوائز المسلحة فقط إما بقضبان فولاذية أو زجاجية. في هذا البحث تم التحقق تجريبياً من سلوك مجموعتين من الجوائز في كل منها ثلاثة جوائز بيتونية مسلحة بشكل هجين بقضبان فولاذية وزجاجية وبنسب مختلفة، وذلك تحت تأثير حمولات متزايدة وصولاً الى الانهيار. حيث حددنا لكل مجموعة قدرة التحمل القصوى، والسهوم في مرحلتي ما قبل التشقق وما بعد التشقق، ونمط الانهيار وانتشار التشققات، وتزايد التشوهات في كل من قضبان التسليح والبيتون المضغوط مع تزايد الحمولات. وتم التوصل الى مجموعة من الاستنتاجات والتوصيات.

**الكلمات المفتاحية:** جوائز بيتونية مسلحة، السهم، قضبان من الالياف البوليميرية الزجاجية (GFRP)، قضبان فولاذية، تسليح هجين، قدرة التحمل، التشققات.

* مدرس – قسم علوم البناء والتنفيذ – كلية الهندسة المعمارية – جامعة طرطوس – طرطوس – سورية.

** مدرس – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

# Behavior of concrete beams hybridly reinforced with steel bars and fiberglass bars (GFRP) - an experimental study.

**Ahmad Mahmoud Mihoub** [*]
**Mervat Hasan Heshmah** [**]

## □ ABSTRACT □

In this research, steel bars and fiberglass bars (GFRP) were used to reinforce six concrete beams. Although the difference between these two types of bars in terms of tensile strength, modulus of elasticity, difference in weight, susceptibility to rust, and differentiation in bonding with concrete made the behavior of these beams differ. For trophies armed only, either with steel or glass bars.

The behavior of two sets of beams, each with three concrete beams reinforced hybridly with steel and glass bars in different proportions, was experimentally verified under the influence of increasing loads until they collapse. We determined for each group the maximum bearing capacity, deflections in the pre-cracking and post-cracking stages, the pattern of collapse and crack propagation, and the increasing deformations in both the reinforcement bars and the compressed concrete with increasing loads. A set of conclusions and recommendations were reached.

**Keywords**: Reinforced concrete beams, deflection, GFRP bars, steel bars, hybrid reinforcement, bearing capacity, cracks.

[*] **Assistant Professor, department of Construction and Implementation Sciences, faculty of Architecture, Tartous University, Tartous, Syria.**
[**] **Assistant Professor, department of structural engineering, faculty of civil engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

**مقدمة:**

إن الفكرة الاساسية لاستخدام التسليح الهجين ( فولاذ +زجاج) في تسليح الجوائز البيتونية المسلحة هي الاستفادة القصوى من ميزات كل من المادتين المختلفتين في الكثير من الخصائص، فالقضبان الزجاجية لها معامل مرونة منخفض وقدرة شد عالية [1]، وغير مقاومة للحريق [6]، وسلوكها خطي الى لحظة الانهيار. ويتعلق تماسكها مع البيتون بشكل سطح القضبان، بينما القضبان الفولاذية ذات معامل مرونة مرتفع وقدرة شد أقل ولها اجهاد خضوع وتماسكها مع البيتون جيد بفضل وجود الحلزنة على سطحها. وقد كثرت الدراسات المتعلقة بسلوك العناصر البيتونية المسلحة بشكل هجين (فولاذ +FRP) في الآونة الأخيرة، وقد تبين أن القضبان الفولاذية تساهم في زيادة القدرة على الانحناء في الجوائز المسلحة بشكل هجين [7]، كما بينت بعض الدراسات أن السهم وعرض الشق يكون أصغر في العناصر المسلحة بشكل هجين عما هو عليه في العناصر المسلحة بالـ FRP لوحده [9]. وفي بحث أخر [4] تبين أن التسليح الهجين للجوائز أدى الى تحسين السلوك الإنعطافي للجوائز من ناحية السهم والتشوه والتشققات مقارنة مع الجوائز المسلحة بالـ GFRP فقط. وفي بحث أخر[3] تمت مقارنة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ مع سلوك الجوائز المسلحة بشكل هجين (فولاذ +FRP ) ليخلص الى نتيجة أنه يمكن زيادة مرونة الجوائز المسلحة بشكل هجين اذا كانت نسبة التسليح بالـ FRP الى نسبة التسليح الفولاذي صغيرة أي $\frac{A_f}{A_s}$ . وبينت الدراسات السابقة أيضاً أنه مع زيادة نسبة التسليح الهجين $\frac{A_f}{A_s}$ فإن تحديد ليونة الجوائز سيكون أكثر تعقيداً لان موضوع خضوع الفولاذ فيها غير واضح [8] . وعلى الرغم من أن العديد من الباحثين السابقين قد قاموا بالتحقيق في العديد من سمات انعطاف الجوائز الهجينة التسليح، الا أن بعض ميزات أداء هذه العتبات لا تزال غير واضحة[8]. وتشمل قضبان البوليمر المقواة بالألياف المتاحة تجارياً قضبان من (الألياف الزجاجية – GFRPأو الألياف الكربونية CFRP – أو الألياف الأراميدية AFRP – أو الألياف البازلتية BFRP ) وتبدي هذه القضبان خواص ميكانيكية مختلفة تبعاً لعامل مرونتها، وتنتج الصناعات الحديثة سطوح مختلفة لهذه القضبان، لناحية زيادة التماسك بينها وبين البيتون، وهناك حاجة إلى الكثير من الابحاث لدراستها في المستقبل.

في العقود الأخيرة تم إجراء الكثير من الأبحاث التجريبية لدراسة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بقضبان FRP فقط وقد بينت أن هذه الجوائز تحقق سهوماً كبيرة وعرض الشقوق فيها أكبر مقارنة بمثيلاتها المسلحة بقضبان فولاذية فقط [5]. و يُنسب هذا إلى معامل المرونة المنخفض لهذه القضبان كما هو موثق في إرشادات الكود ACI 440.1R-12 لتصميم العناصر الخرسانية المسلحة بقضبان FRP [2] .

تم تنفيذ العمل البحثي الحالي للتحقيق تجريبياً في سلوك الجوائز الخرسانية المسلحة بشكل هجين بقضبان (فولاذية + زجاجية) والعاملة على الانعطاف تحت تأثير التحميل الستاتيكي المتزايد، وتم رصد قدرة التحميل القصوى، والسهم لكل خطوة تحميل، وتطور عرض الشق في مجموعتين من الجوائز في كل منها ثلاث عينات متماثلة من الجوائز وقد اختلفت فيها نسبة التسليح بالـ FRP الى نسبة التسليح الفولاذي $\frac{A_f}{A_s}$، وتم فحص الاستجابة الكلية لهذه الجوائز ووضعت مقارنات للنتائج التجريبية المقاسة، وتم عرضها والتعليق عليها في هذه الدراسة.

**أهمية البحث وأهدافه:**

تتميز القضبان الزجاجية بقدرة عالية على الشد وانخفاض في معامل المرونة مقارنة مع القضبان الفولاذية كما أن هناك اختلاف من ناحية التماسك مع البيتون ما يجعل سلوك العناصر المسلحة بشكل هجين (بقضبان زجاجية وأخرى فولاذية) سلوكاً مختلفاً عن نظيراتها المسلحة بالفولاذ لوحده أو الزجاج لوحده، وهنا تكمن أهمية هذا البحث في تسليط الضوء على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين (بقضبان زجاجية وأخرى فولاذية)، من خلال رصد قدرة تحملها وآلية انهيارها وانتشار التشققات فيها وقيم السهوم فيها والتشوهات النسبية في قضبان التسليح والبيتون المضغوط وصولاً الى لحظة الانهيار.

**طرائق البحث ومواده:**

استخدمنا الطريقة التجريبية في دراسة سلوك مجموعتين من الجوائز في كل منها ثلاثة جوائز بيتونية مسلحة بقضبان من الألياف الزجاجية والفولاذية وهي متماثلة من حيث الابعاد الهندسية وتختلف من حيث نسب التسليح ونوعه (فالمجموعة الاولى مسلحة بقضيب زجاجي قطر 12 ملم مع قضيبين فولاذيين قطر 12 ملم، والمجموعة الثانية مسلحة بقضيب

فولاذي زجاجي قطر 12 ملم مع قضيبين زجاجيين قطر 12 ملم)، وفي الجوائز المختبرة أخذت القيم الوسطية لقيم السهوم ولقيم قدرات التحمل وعدد التشققات وعرضها وقيم التشوهات النسبية في قضبان الـ GFRP والقضبان الفولاذية والبيتون المضغوط، وقد توصلنا الى استنتاجات وتوصيات عرضت في نهاية هذا البحث.

**1. العمل التجريبي:**

تم تنفيذ المشروع التجريبي للتحقيق في سلوك مجموعتين من الجوائز البيتونية المعرضة للانحناء والمسلحة بشكل هجين بقضبان GFRP وقضبان فولاذية تحت تأثير التحميل الستاتيكي المتزايد وتمت مراقبة سلوك هذه الجوائز من بداية التحميل وصولاً الى لحظة الانهيار، حيث قمنا بتحضير هذه الجوائز واختبارها في مخابر جامعة روستوف الحكومية للهندسة المدنية في روسيا الاتحادية خلال العام الدراسي 2012.

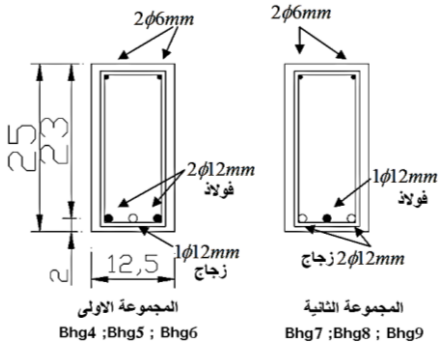
**1.1. توصيف العينات المختبرة:**

تم صب مجموعتين من الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين في كل منها ثلاثة جوائز متماثلة من ناحية الأبعاد والتسليح السفلي عبارة عن 3 قضبان قطر 12 ملم وهي كما يلي: (المجموعة الاولى (Bhg6 ; Bhg5; Bhg4) مسلحة بقضيب زجاجي قطر 12 ملم مع قضيبين فولاذيين قطر 12 ملم، والمجموعة الثانية ( Bhg9 ; Bhg8; Bhg7 ) مسلحة بقضيبين زجاجيين قطر 12 ملم مع قضيب فولاذي قطر 12 ملم. واختبرت تجريبيا تحت تأثير حمولتين مركزتين (نظام تحميل في أربع نقاط four–point loading ). حيث B للدلالة على الجائز Beam، و g للدلالة على التسليح بالزجاج Glass، و h للدلالة على التسليح الهجين hybrid.

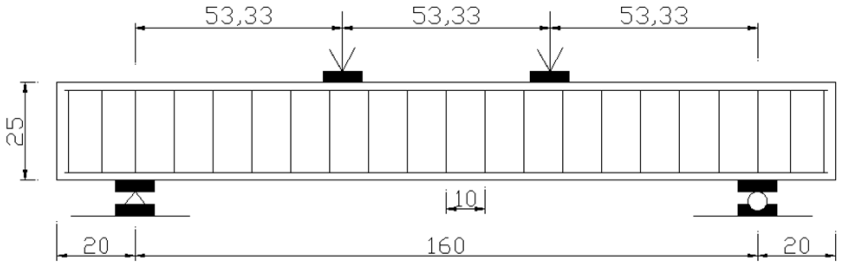
ويبين الشكل (2) الأبعاد الهندسية للمقطع العرضي بينما يبين الشكل (2) المقطع الطولي لهذه الجوائز وتفاصيل التسليح المختلفة. حيث يبلغ طول كل من الجوائز 2 m ، ونسبة العرض إلى الارتفاع mm b / h = 250/125 ، والعمق الفعال mm d = 230 ، وتم تسليح منطقة الضغط بقضبان فولاذية بقطر 6 mm عدد 2، وتم تسليح الجوائز على القص بأساور فولاذية قطر 6 mm وتباعد يساوي 100 mm .

**2.1. خصائص المواد:**

استخدمت في صناعة قضبان GFRP تقنية pultrusion للألياف الزجاجية، وهي من إنتاج مصنع القضبان الزجاجية GFRP في مدينة بيرم الروسية وتتمتع بالمواصفات التالية: ألياف زجاجية مستمرة ذات مقاومة على الشد تساوي 1200 MPa، ومعامل المرونة يساوي 35 GPa. تم تشبيع هذه الألياف باللاصق البوليميري لإنتاج القضبان، ويميز قضبان GFRP المستخدمة سطح خارجي مكون من الياف ملفوفة على القضبان بشكل حلزوني لزيادة التماسك مع البيتون كما مبين في الشكل (3)، أما للتسليح الفولاذي فقد استخدمت قضبان فولاذية محلزنة بقطر 12 ملم وذات مقاومة على الشد تساوي 700 MPa واجهاد خضوعها يساوي 622 MPa، وفي الشكل (3) نبين مقارنة لنوعي قضبان التسليح الزجاجية GFRP والفولاذية المستخدمة في بحثنا هذا.




**الشكل (2): الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة (الأبعاد بـ سم).**




**الشكل (2): الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة (الأبعاد بـ سم).**

**الشكل (3): مقارنة بين القضبان الزجاجيةGFRP والقضبان الفولاذية المستخدمة في البحث.**

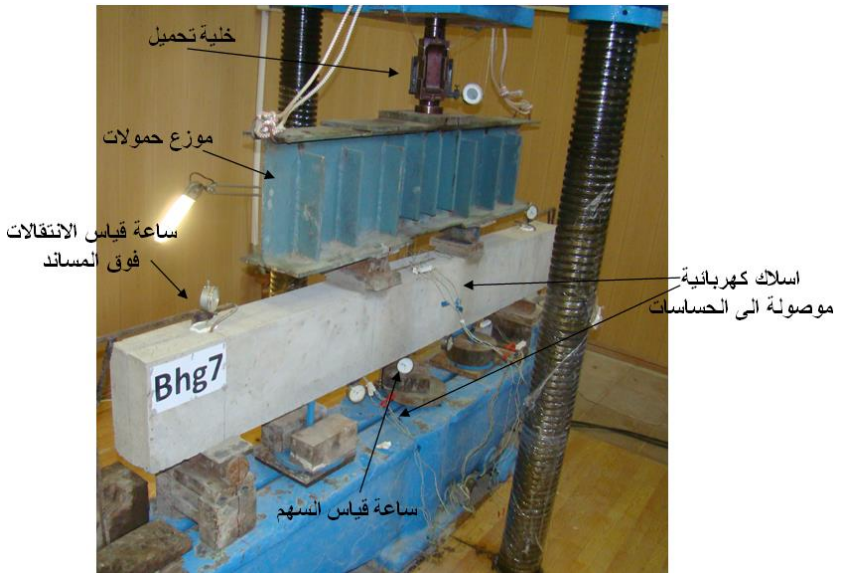
**الشكل (4): شكل هياكل التسليح للجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين (بثلاثة قضبان 2 زجاجية GFRP و 1 فولاذي) أو(بثلاثة قضبان 1 زجاجي GFRP و 2 فولاذية) وهي بوضعيه مقلوبة.**

تم اختبار المكعبات البيتونية مقاس (150*150*150) mm تحت ضغط مركزي في يوم اختبار الجوائز. والبيتون المستخدم ذو مقاومة عالية نسبياً، حيث بلغ متوسط مقاومة الضغط للمكعبات البيتونية (30 Mpa لجوائز المجموعة الاولى و29.8 Mpa لجوائز المجموعة الثانية)، وذلك لتجنب الانهيار المبكر لمنطقة الضغط البيتوني، وأبعاد البحص المستخدم في الخلطة الخرسانية كانت ضمن المجال (10–25 mm)، وكانت النسب الوزنية لمواد الخلطة البيتونية المحضرة لـ 1 $m^3$ كما يلي: اسمنت بورتلاندي 450 كغ، وبحص 1270 كغ، ورمل كوارتزي 460 كغ ووزن الماء 207 كغ ونسبة الماء الى الاسمنت تساوي 0.46.

### 3.1. التحضير للاختبار والتجهيزات المستخدمة:

تم استخدام الجهاز المبين في الشكل (5) لاختبار الجوائز على الانعطاف تحت تأثير حمولتين مركزتين، واستندت الجوائز بشكل بسيط عند اطرافها، وتم تطبيق الحمل في نقطتين بمسافة 533.3 cm فيما بينهما، وطول مجال القص يساوي أيضاً 533.3 cm

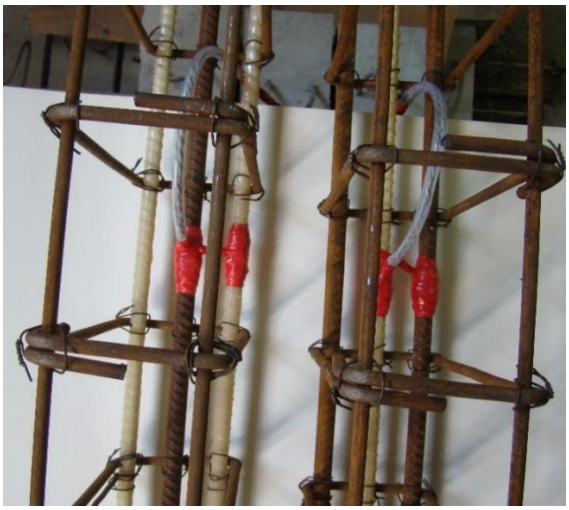
. ولجهاز الاختبار طرف ثابت سفلي صلب، وطرف علوي متحرك بشكل شاقولي، وزاد الحمل باستمرار وبجرعات قليلة، حيث تم التحميل في المرحلة الأولى بثلاث دفعات تحميل كلٌ منها 4KN تلا ذلك التحميل بدفعات 8KN وبعد ذلك بدفعات 16KN إلى مستوى تحميل يساوي 80% من الحمولة القصوى، بعد ذلك تم التحميل بدفعات 8KN حتى حصول انهيار الجوائز.




**الشكل (5): جهاز اختبار العينات على الانحناء مبين عليه توضع الجائز البيتوني المختبر وموزع الحمولة وخلية التحميل ومختلف ساعات قياس الانتقالات وأماكن توضع حساسات التشوه وجهاز قياس التشوهات.**

تم تسجيل قيم الحمل المطبق بواسطة خلية تحميل وضعت بين الجائز البيتوني وموزع الحمولة، وهو عبارة عن جائز فولاذي عالي الصلابة كما موضح في الشكل (5)، تم قياس السهوم باستخدام خمسة أجهزة ساعية لقياس السهوم وهي بدقة 0.005 mm. حيث وضع واحد منها في منتصف الجائز وعلى وجهه السفلي، واثنان وضعا تحت نقطة تطبيق القوة وعلى الوجه السفلي، واثنان عند المساند وعلى الوجه العلوي للجائز وبهذه الطريقة تم حساب السهوم الصافية بدقة. حيث تم تسجيل قياسات الحمل والسهم المقابل بشكل مستمر أثناء الاختبارات التي تم إجراؤها حتى انهيار الجوائز. ولقياس التشوهات الحاصلة في قضبان GFRP المشدودة والبيتون المضغوط على الجهة العلوية وفي منتصف الجائز، تم لصق حساسات تشوه على القضبان الزجاجية بعد تنظيفها وازالة الألياف الملفوفة عن السطح في

منتصف المجاز وتم عزلها جيداً ووصلها بالأسلاك الكهربائية المناسبة لحمايتها أثناء عملية الصب كما مبين بالشكلين (6) و (7)، وكذلك الامر تم لصق حساسات تشوه على الوجه البيتوني العلوي للجائز وفي منتصف المجاز لقياس التشوهات الحاصلة في البيتون المضغوط أثناء عملية الاختبار ووصلت الأسلاك جميعها الى جهاز قياس التشوهات كما مبين في الشكل (8)، ويبين الشكل (9) الأدوات والمواد المستخدمة لتوصيل ولصق وعزل الحساسات بعد لصقها على قضبان GFRP والبيتون المضغوط.



**الشكل (6): هيكل التسليح للجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين، مبين علية مكان لصق حساسات تشوه على القضبان الزجاجية GFRP والفولاذية وكيفية عزل الحساسات حتى لا تتضرر أثناء عملية الصب.**

**الشكل (7): شكل القضبان الزجاجية GFRP والفولاذية مبين عليها كيفية لصق حساسات التشوه.**

**الشكل (8): جهاز قياس التشوهات النسبية في كل من قضبان الزجاجية GFRP والفولاذية والبيتون المضغوط.**

**الشكل (9): الأدوات والمواد المستخدمة لتوصيل ولصق وعزل الحساسات بعد لصقها على القضبان الزجاجية GFRP والفولاذية والبيتون المضغوط.**

## 2 . النتائج والمناقشة:

استغرق اختبار الجائز الواحد حوالي 3 ساعة، وبعد كل مرحلة تحميل أخذت جميع القراءات المتعلقة بقيم السهم وعرض التشققات وقيم التشوهات النسبية في القضبان والبيتون المضغوط وحددت التشققات ليتم معالجة النتائج لاحقاً.

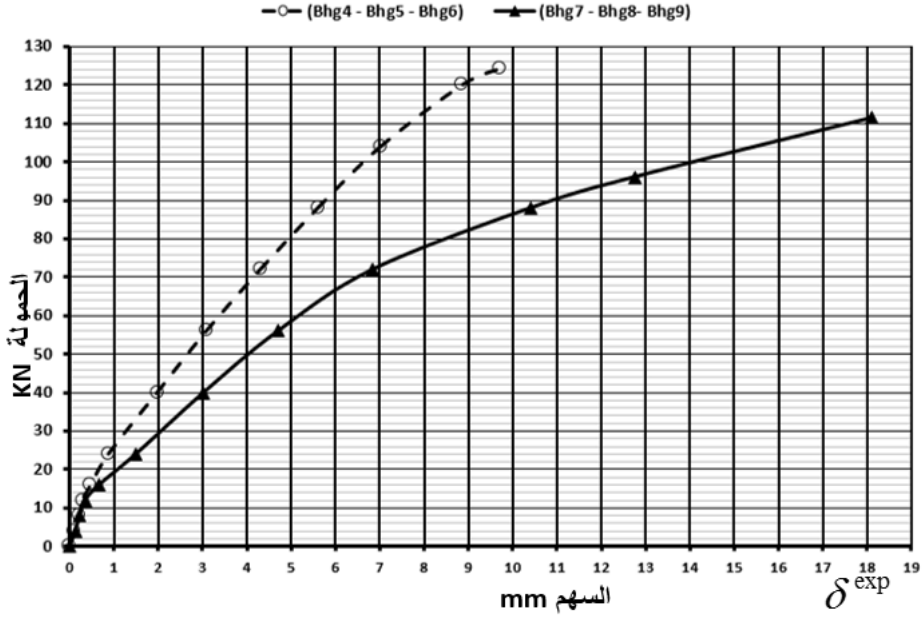
### 2 . 1. النتائج المتعلقة بالسهم:

يعرض الشكل (10) مقارنة لمنحنيات (حمولة . سهم) لجوائز المجموعة الاولى Bhg4 ; Bhg5 ; Bhg6، وجوائز المجموعة الثانية Bhg7 ; Bhg8 ; Bhg9 ، حيث قيس السهم في منتصف المجاز من بداية التحميل وصولاً الى لحظة الانهيار للجوائز. ومنها يتبين أن المنحنيات كانت خطية في الجزء الأول ومن الحمولة 0 KN وحتى (مستوى التحميل 14 KN) وبعد أن بدأت الجوائز بالتشقق نلاحظ وجود اختلاف واضح بين منحني المجموعة الاولى منحني المجموعة الثانية وصولاً الى لحظة الانهيار، وكان منحني المجموعة الاولى أعلى من منحني المجموعة الثانية. ويبين الجدول(1) مقارنة قيم السهوم الاعظمية في وسط المجاز لجوائز المجموعة الاولى والثانية، وكان السهم الأعظمي لجوائز المجموعة الأولى

عند الحمل 124.27 KN مساوياً(9.73mm) أي حوالي 53.8 % من قيمة السهم الاعظمي لجوائز المجموعة الثانية عند الحمل 111.35 KN والذي بلغ (18.1mm)، ويبين الجدول (2) قيم السهم المقاسة في مختلف مراحل التحميل وكذلك القيم الوسطية للمجموعة الاولى والثانية.

**الجدول (1): مقارنة قيم السهوم الأعظمية في وسط المجاز لمجموعتي الجوائز المختبرة.**

| اسم المجموعة | أسم الجوائز | القيمة الوسطية للسهم الأعظمي في وسط المجاز ($\delta_{\max}^{\exp}$ mm) | الحمولة الأعظمية KN |
|---|---|---|---|
| المجموعة الاولى | Bhg4 ;Bhg5 ; Bhg6 | 9.73 | 124.27 |
| المجموعة الثانية | Bhg7 ;Bhg8 ; Bhg9 | 18.1 | 111.35 |




**الشكل (10): مقارنة بين منحنيات (حمولة – سهم) لجوائز المجموعة الاولى Bhg4 ;Bhg5 ; Bhg6، وجوائز المجموعة الثانية Bhg7 ;Bhg8 ; Bhg9.**

**الجدول (2): مقارنة قيم السهوم المقاسة في وسط المجاز لجوائز المجموعتين الاولى والثانية.**

| الحمولة KN | القيمة الوسطية للسهم في جوائز المجموعة الاولى Bhg4 ;Bhg5 ; Bhg6 mm | القيمة الوسطية للسهم في جوائز المجموعة الثانية Bhg7 ;Bhg8 ; Bhg9 mm |
|---|---|---|

| | | |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0.13 | 0.1 | 4 |
| 0.23 | 0.21 | 8 |
| 0.35 | 0.29 | 12 |
| 0.67 | 0.48 | 16 |
| 1.5 | 0.88 | 24 |
| 3.03 | 1.98 | 40 |
| 4.71 | 3.09 | 56 |
| 6.85 | 4.31 | 72 |
| 10.42 | 5.61 | 88 |
| 12.76 | | 96 |
| | 7.03 | 104 |
| 18.1 | | 111.3 |
| | 8.87 | 120 |
| | 9.73 | 124.2 |

ولتحليل النتائج المتعلقة بالسهوم أخت بالحسبان الحدود القصوى المسموحة للسهوم وسط المجاز وهي تساوي $\delta = (\frac{1}{200}) l_0$ حسب بعض النورمات ومنها النورم الروسي [10]، وهذه القيمة تساوي 8 ملم في جوائزنا، حيث $l_0$ = طول مجاز الجائز ويساوي 160 سم. وعند مقارنة الحمولات المسببة لهذه القيمة على منحنيات (حمولة – سهم) المبينة في الشكل (10) نلاحظ في جوائز المجموعة الاولى أن السهم الحدي المسموح يصل إلى هذه القيمة عند الحمولة (113 KN) وهي تساوي تقريباً91 % من حمولة الانهيار، وفي جوائز المجموعة الثانية يصل السهم الحدي المسموح إلى هذه القيمة عند الحمولة (78 KN) وهي تساوي تقريباً 62.7 % من حمولة الانهيار.

**2 . 2. مقاومة الجوائز على الانعطاف:**

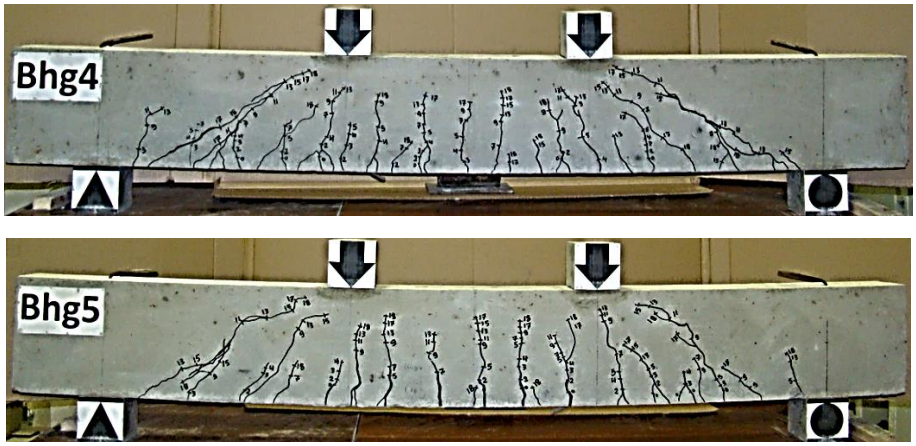
يبين الجدول (3) قدرات التحمل القصوى للجوائز البيتونية المسلحة المختبرة لجوائز المجموعة الاولى Bhg6 ; Bhg5; Bhg4 وجوائز المجموعة الثانية ; Bhg8; Bhg7 Bhg9 حيث بلغت القيمة الوسطية لقدرة التحمل 114.5 KN وكان شكل الانهيار في جوائز المجموعة الاولى على شكل تطاول في قضبان التسليح وفي جوائز المجموعة الثانية على شكل تطاول في قضبان التسليح وتحطم البيتون المضغوط، وكانت قدرة التحمل لجوائز المجموعة الأول تساوي(124.27 KN) وهي أكبر بمقدار 11.6 % من قدرة تحمل جوائز المجموعة الثانية حيث بلغت قدرة تحملها(111.35 KN).

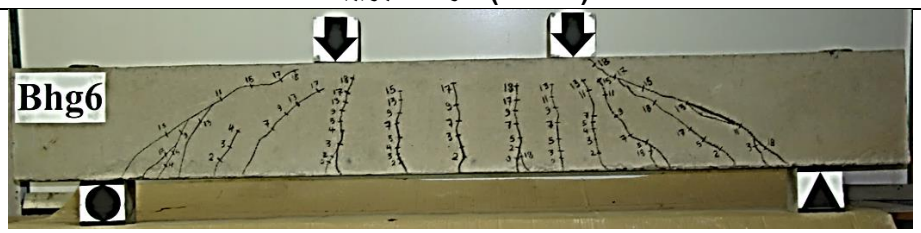
الجدول (3): مقارنة قدرات تحمل الأعظمية للجوائز المختبرة وأشكال انهيارها.

| اسم المجموعة | أسم الجوائز | قدرة التحمل القصوى $N_{\max}^{\exp}$ (KN) | شكل الانهيار في الجوائز |
|---|---|---|---|
| المجموعة الاولى | Bhg4 ;Bhg5 ; Bhg6 | 124.27 | تطاول قضبان التسليح الطولية |
| المجموعة الثانية | Bhg7 ;Bhg8 ; Bhg9 | 111.35 | تحطم البيتون المضغوط وتطاول قضبان التسليح الطولية |

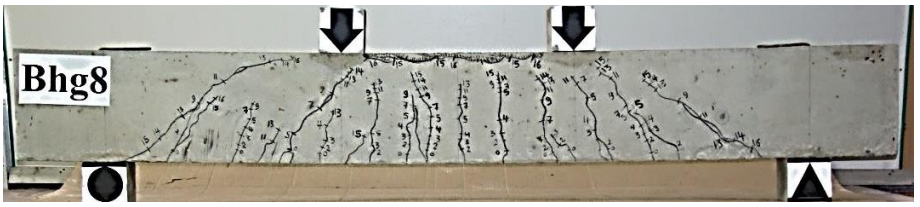
## 2 . 3. مقارنة شكل التشققات وانتشارها وعرضها في الجوائز المختبرة للمجموعتين:

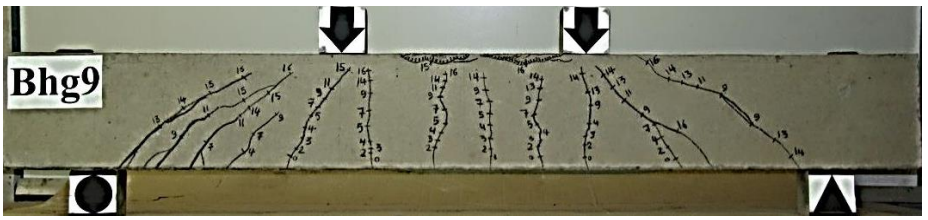
يبين الشكل (11) صور لجوائز المجموعة الأولى المختبرة Bhg6 ; Bhg5; Bhg4 وتظهر عليها أشكال التشققات وانتشارها، ونلاحظ أن عدد الشقوق في النصف السفلي لارتفاع الجوائز كبيراً مقارنة مع باقي ارتفاعها، ويتشعب الشق عند مستوى قضبان التسليح الزجاجية GFRP والفولاذية الى فرعين على شكل (٨) وصولاً الى اسفل الجائز وهذا ناتج عن التطاول الحاصل في قضبان التسليح، وعند رصد منطقة الانعطاف الصافي بطول 53.3 سم تبين أن متوسط عدد الشقوق يساوي 6 شقاً. وأغلبها يمتد من أسفل الجوائز الى ارتفاع يساوي تقريباً ثلاثة أرباع ارتفاع الجوائز المختبرة.






**الشكل (11): أشكال التشققات وانتشارها في جوائز المجموعة الاولى المختبرة Bhg6 ; Bhg5; Bhg4 .**

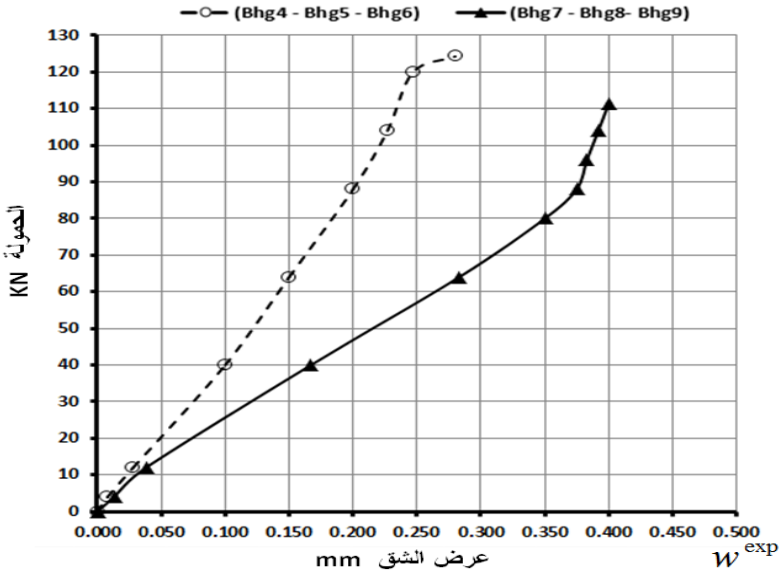



**الشكل (11): أشكال التشققات وانتشارها في المجموعة الثانية المختبرة Bhg9 ; Bhg8; Bhg7 .**

ويبين الشكل (11) صور لجوائز المجموعة الثانية المختبرة Bhg9 ; Bhg8; Bhg7 وتظهر عليها أشكال التشققات وانتشارها، ونلاحظ أن ارتفاع الشقوق يصل تقريباً الى أعلى ارتفاع الجوائز، ويتشعب الشق عند مستوى قضبان التسليح الزجاجية GFRP والفولاذية الى فرعين على شكل (٨) وصولاً الى اسفل الجائز وهذا ناتج عن التطاول الحاصل في قضبان التسليح، وعند رصد منطقة الانعطاف الصافي بطول 53.3 سم تبين أن متوسط عدد الشقوق يساوي 7 شقاً. ويبين الشكل (12) منحنيي (حمولة–عرض الشق) عند مستوى قضبان التسلح (وسط المجاز) وقد اخذت القيم الوسطية في جوائز المجموعتين الاولى (Bhg4;Bhg5; Bhg6) والثانية (Bhg7 ;Bhg8 ; Bhg9). ونلاحظ أن منحني المجموعة الاولى أعلى من منحني المجموعة الثانية، وبالتالي كلما زاد عدد القضبان

الزجاجية في المقطع يزداد عرض الشق، ونلاحظ في منحني المجموعة الثانية توقف أو تباطؤ في اتساع الشقوق وذلك بسبب تشكل الشقوق المائلة و إتساعها على حساب الشقوق الشاقولية وبسبب تشكل شقوق ثانوية جديدة وصولاً الى لحظة الانهيار. وبلغ عرض الشق الاعظمي في جوائز المجموعة الاولى 0.28 mm، بينما وبلغ عرض الشق الاعظمي في جوائز المجموعة الثانية 0.4 mm، أي بزيادة تساوي 43% عن جوائز المجموعة الاولى.



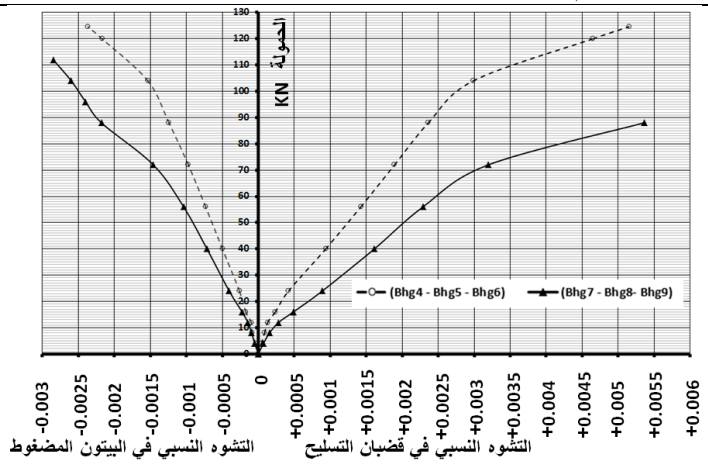

**الشكل (12): مقارنة بين منحنيات (حمولة – عرض الشق) عند مستوى قضبان التسلح وسط المجاز لجوائز المجموعة الاولى** Bhg6 ; Bhg5; Bhg4، **وجوائز المجموعة الثانية** Bhg9 ; Bhg8; Bhg7.

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

سبق وأن ذكرنا أنه في منتصف الجائز وعلى السطح البيتوني العلوي لصقت حساسات تشوه خارجية وكذلك حساسات تشوه داخلية على قضبان التسليح الزجاجية والفولاذية، ووصلت جميعها إلى محطة قياس التشوهات، التي سجلت قيم التشوهات النسبية الحاصلة بعد كل دفعة تحميل، ومن الجدول(5) يتبين أن البيتون المضغوط لم يتحطم في جوائز المجموعة الاولى وأن قيمة التشوه النسبي فيه بلغت(0.00237)، في حين أن التشوه النسبي في القضبان الزجاجية GFRP والفولاذية بلغ القيمة (0.00515)، ومن نفس الجدول يتبين أن البيتون المضغوط تحطم في جوائز المجموعة الثانية بعد أن تجاوزت قيمة التشوه النسبي القيمة (0.00285)، في حين أن التشوه النسبي في القضبان الزجاجية GFRP والفولاذية بلغ القيمة (0.00536) ومن ثم توقفت الحساسات عن العمل نتيجة انسلاخها عن القضبان وذلك عند حمولة تساوي 88 KN. وتظهر على الشكل (13) مقارنة لمنحنيات (حمولة – تشوه نسبي) في قضبان التسليح و(حمولة – تشوه نسبي) في البيتون المضغوط للجوائز المختبرة، ومنها نستنتج أن التشوهات النسبية الحاصلة في القضبان تكون أكبر من التشوهات النسبية الحاصلة في البيتون عند نفس الحمولة، وأن منحنيات المجموعة الأولى أعلى من منحنيات المجموعة الثانية.

**الجدول (5): مقارنة قيم التشوهات الحدية في البيتون المضغوط وقضبان تسليح الجوائز المختبرة.**

| اسم المجموعة | أسم الجوائز | قدرة التحمل القصوى ( $N_{\max}^{\exp}$ KN) | متوسط قيمة التشوه النسبي الحدية لحظة الانهيار | |
|---|---|---|---|---|
| | | | في قضبان التسليح عند منتصف المجاز | في البيتون المضغوط عند منتصف المجاز |
| المجموعة الاولى | Bhg4 ;Bhg5 ; Bhg6 | 124.27 | +0.00515 | - 0.00237 |
| المجموعة الثانية | Bhg7 ;Bhg8 ; Bhg9 | 111.35 | +0.00536 (وعندها خرجت الحساسات عن الخدمة عند الحمل 88KN) | - 0.00285 |




**الشكل (13): مقارنة بين منحنيات (حمولة – تشوه نسبي) عند مستوى قضبان التسلح وسط المجاز، و(حمولة – تشوه نسبي) في البيتون المضغوط وسط المجاز لجوائز المجموعة الاولى Bhg4; Bhg5 ; Bhg6، وجوائز المجموعة الثانية Bhg7; Bhg8 ; Bhg9 وقد اخذت القيم الوسطية في الجوائز الثلاثة المختبرة.**

**3 . الاستنتاجات والتوصيات:**

يمكن اقتراح استخدام القضبان الزجاجية GFRP مع القضبان الفولاذية للتسليح الهجين للجوائز البيتونية، حيث يمكن الاستفادة من ميزات القضبان GFRP من ناجية مقاومتها للصدأ وأنها ذات قوة عالية على الشد وغير قابلة للمغنطة وخفيفة الوزن، حيث ينصح بوضعها ضمن المقطع في الأطراف، غير أن الجوائز المسلحة بشكل هجين وبنسبة كبيرة للقضبان الزجاج تصبح أكثر تقوساً وكذلك يزداد عرض التشققات فيها.

وعند إجراء مطالعة لقيم التحمل الاعظمية وقيم السهوم وشكل التشققات وانتشارها في الجوائز المختبرة والمسلحة بشكل هجين بقضبان زجاجية GFRP وأخرى فولاذية استخلصنا النتائج التالية:

1- تظهر منحنيات (حمولة . سهم) أن السهم يزداد بازدياد نسبة القضبان الزجاجية في المقطع المسلح بشكل هجين.

2- وصلت الجوائز المسلحة بشكل هجين (المجموعة الاولى) الى الحد الأقصى للسهم المسموح حسب الكود الروسي عند حمولة تساوي 91% من قدرة تحملها، بينما وصلت الجوائز المسلحة بشكل هجين (المجموعة الثانية) الى الحد الأقصى للسهم المسموح عند حمولة تساوي 62.7% من قدرة تحملها.

**3**- بلغت قدرة التحمل الاعظمية في الجوائز المسلحة بشكل هجين (المجموعة الاولى) القيمة 124.27 KN وهي أكبر بمقدار 11.6 % من قدرة تحمل المجموعة الاولى، وكان شكل الانهيار فيها على شكل تطاول في قضبان التسليح، بينما بلغت قدرة التحمل الاعظمية في الجوائز المسلحة بشكل هجين (المجموعة الثانية) القيمة 111.35 KN وكان شكل الانهيار فيها على شكل تطاول في قضبان التسليح وتحطم البيتون المضغوط.

4- يزداد عدد التشققات في الجوائز المسلحة بشكل هجين بقضبان زجاجية GFRP وفولاذية مع ازدياد نسبة القضبان الزجاجية.

5- في الجوائز المسلحة بشكل هجين (المجموعة الاولى) بلغ عرض الشق الاعظمي القيمة 0.28 mm، بينما بلغ عرض الشق الاعظمي في جوائز (المجموعة الثانية) القيمة 0.4 mm، أي بزيادة تساوي 43%عن جوائز المجموعة الاولى.

6- في الجوائز المسلحة بشكل هجين (المجموعة الاولى) بلغت التشوهات النسبية في القضبان القيمة 0.00515، بينما بلغت التشوهات النسبية في بيتونها المضغوط القيمة 0.00237 ، وفي الجوائز المسلحة بشكل هجين (المجموعة الثانية) بلغت التشوهات النسبية في القضبان القيمة 0.00535 بعدها خرجت الحساسات عن الخدمة، وبلغت التشوهات النسبية في بيتونها المضغوط القيمة 0.00285 ، وكانت التشوهات في القضبان أكبر من التشوهات في البيتون عند نفس الحمولة في جوائز المجموعتين المختبرتين.

7- تزداد التشوهات النسبية مع ازدياد نسبة القضبان الزجاجية في المقطع المسلح بشكل هجين (زجاج + فولاذ).

**المراجع:**

[1]- Aiello, M. A.; Ombres, L. 2002. structural performances of concrete beams with hybrid ( fiber-reinforced polymer- steel) reinforcements. **J. Compos. Constr**.,6,133-140.

[2]- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI. 2012, Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. **ACI 440.1R-12**, Detroit. U.S.A.

[3]- Bui, I. V. H.; Stitmannaithum, B. ; Ueda, T. 2018. Ductility of concrete beams reinforced with both fiber- reinforced polymer and steel tension bars. **Journal of advanced concrete technology**.16, 531-548

[4]- El Refai, A.; Abed, F.; Al-Rahmani, A. 2015. Structural performances and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars. **Constr. Build. Mater.** 96,518-529.

[5]- LEUNG, H. Y.; BALENDRAN, R. V.2003. Flexural behavior of concrete beams internally reinforced with GFRP rods and steel rebars. **J. Struct. Surv**., VOL. 21. № 4, 146–157. U.S.A.

[6]- Nadjai, A.; Talamona, D.; Ali, F. 2005. fire performances of concrete beams with FRP Bars. **Proc, of Int. Symp. On Bond behavior of FRP in Structures**,.,401-410. Hong Kong.

[7]- Qu, W.; Zhang, X.; Huang, H. 2009. Flexural behavior of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars. **J. compos. Constr**.13,350-359.

[8]- Rendy, T.; Zaidir, Z. ; Devitasari, I. 2022. Ductility Estimation of Concrete forced with Hybrid FRP-Steel Bars. **Journal of department of civil engineering faculty**, **Andalas university**, Indonesia.

[9]- Yinghao, L.; Yong, Y. 2013. Arrangement of hybrid rebars on flexural behavior of HSC beams. **Compos. Part B**. 45,22-31.

[10]- СП 52-101. 2003, *Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры*. **ООО "Аналитих**". СТ.161. Москва.