

دراسة تأثير توزيع القضبان الكربونية CFRP في مقاطع الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين على سلوكها الإنعطافي

الدكتور غاندي علي ججاج*

الدكتور أحمد علي عبود**

ميرفت حسن حشمة***

(تاريخ الإيداع 30 / 1 / 2014. قُبل للنشر في 18 / 3 / 2014)

□ ملخص □

إن الاستخدام المشترك لقضبان فولاذية وكربونية في تسليح الجوائز البيتونية يؤدي إلى الحصول على جوائز ذات سلوك يختلف عن سلوك الجوائز المسلحة بالفولاذ فقط. يتعرض هذا البحث لحالة تسليح الجوائز بطبقتين من القضبان والمتغيرات الأساسية هي نسبة التسليح وتوزيع القضبان الكربونية في المقطع العرضي. تم اختبار أربع مجموعات مكونة من 12 جائزاً، كل منها مسلح بأربعة قضبان متوضعة على طبقتين، وتضم المجموعة الأولى ثلاثة جوائز معيارية مسلحة بقضبان فولاذية، أما المجموعة الثانية فتضم ثلاثة جوائز مسلحة بقضبان كربونية. وتضم كل من المجموعتين الثالثة والرابعة ثلاثة جوائز مسلحة بقضبيي فولاذ وقضبيي كربون، حيث في المجموعة الثالثة تتوضع القضبان الفولاذية في الطبقة العلوية والكربونية في الطبقة السفلية، وفي المجموعة الرابعة تتوضع القضبان الفولاذية في الطبقة السفلية والكربونية في الطبقة العلوية.

حصلت في جوائز المجموعة الثانية المسلحة بقضبان كربونية قيم أكبر للسهم وزادت قدرة التحمل بالمقارنة مع الجوائز الأخرى، وكان لجوائز المجموعتين الثالثة والرابعة تقريباً نفس قدرة التحمل الأعظمية وتماثلت في سلوكها حتى مستوى تحميل يساوي تقريباً 75% من قدرة تحملها وبعد ذلك زادت التشوهات في المجموعة الرابعة مقارنة مع المجموعة الثالثة حتى الانهيار.

الكلمات المفتاحية: جوائز بيتونية مسلحة، تسليح هجين، طبقات التسليح، قضبان كربونية، السهم، قدرة التحمل القصوى، التشوهات، 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.

Studying the Influence of the Distribution of Carbon Rods in the Sections of Reinforced Concrete Beams with Hybrid Reinforcement on their Flexural Behavior

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

(Received 30 / 1 / 2014. Accepted 18 / 3 / 2014)

□ ABSTRACT □

The mixed use of steel bars and carbon rods in concrete beams can offer beams with different behaviour from that of steel reinforcement only. This paper studies the case of reinforcing concrete beams with two layers of bars, and the main parameters investigated are the proportion and the distribution of carbon rods in the cross-section. Four groups containing 12 beams are tested, and each is reinforced with 4 bars located in two layers. The first group includes three control beams reinforced with steel bars, while the second includes three beams reinforced with carbon bars. Each of the third and fourth groups includes three beams reinforced with two steel bars and two carbon bars, whereas in the third group, steel bars are located above carbon ones, but in the fourth group, steel bars are located under carbon ones. Concrete beams reinforced with carbon rods in the second group exhibit a higher load carrying capacity and deflections, compared with other beams. However, the beams in the third and fourth groups have approximately the same load carrying capacity and the same behaviour up to the load level equal to 75% of their load carrying capacity. But after that, the beams in the fourth group become more deformed, compared with those of the third group.

Keywords: Reinforced concrete beams, hybrid reinforcement, the layers of reinforcement, Carbon FRP bars, deflection, load carrying capacity, deformations, 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:

يشكل صدأ حديد التسليح مشكلة أساسية في المنشآت البيتونية المسلحة، ويسبب زيادة كبيرة في تكاليف الصيانة وخاصة في المنشآت ذات الأهمية الإستراتيجية كالجسور، ويتطور الصدأ في فولاذ التسليح بسبب تذبذب قلوية البيتون مما يؤدي إلى تدهوره ويقلل من عمره الاستثماري [1]، ويبين الشكل (1) مدى خطورة الصدأ على المنشآت البيتونية المسلحة بالفولاذ، كل ذلك قاد للتفكير بطرق عملية للتصدي لمشكلة الصدأ مثل:

• تطوير مواد تسليح جديدة ذات مقاومة عالية على الشد ومقاومة للصدأ. تعتبر القضبان الكربونية CFRP بديلاً جيداً للتسليح في بعض المنشآت البيتونية المسلحة، حيث إن هذه القضبان لا تصدأ عادة ما تكون قدرة تحملها على الشد أعلى من نظيراتها الفولاذية ولكن على حساب انخفاض قابليتها للسحب، كما أن منحنى إجهاد تشوه لا يحتوي على عتبة سيلان واضحة بالإضافة لانخفاض معامل مرونتها، ومن الشائع استخدام القضبان الكربونية بكثرة في الأوساط الملوثة، مثل البيئات الساحلية ومحطات المعالجة والجدران الاستنادية البحرية والأرصفة البحرية والأنفاق الصندوقية والركائز ذكر ألواح التجفيف في محطات المعالجة والجدران الاستنادية البحرية والأرصفة البحرية والأنفاق الصندوقية والركائز المسلحة والأرصفة العائمة والخزانات والصوامع والواجهات وجدران الحماية الأمامية المجاورة للبحر. وتم استخدام القضبان الكربونية في كندا خلال العقد الماضي كتسليح لبلاطات الجسور نظراً لموسمية استعمال الأملاح المزيلة للجليد والتي بدورها تسبب حدوث الصدأ في فولاذ التسليح التقليدي [3].



الشكل (1) التضرر الكبير في المنشآت البيتونية المسلحة نتيجة صدأ فولاذ التسليح

وبالإضافة لمقاومة الصدأ فإن القضبان الكربونية تتمتع بخاصية عدم التمعظ وهي ضرورية في بعض المنشآت البيتونية التي تتطلب أن تكون خالية من المعادن مثل غرف التصوير بالرنين المغناطيسي في المشافي أو المعاهد

البحثية وغرف العناية المشددة ومنشآت الاتصالات وبلاطات الجسور والطرق القريبة من البوابات الالكترونية المخصصة لدفع أجور استخدام الطرق، فهذه المنشآت مرشحة أكثر من غيرها للتسليح بقضبان من FRP [4].

• تحقيق حماية لقضبان التسليح الفولاذية عن طريق زيادة طبقة التغطية البيتونية. بالاستخدام المشترك (تسليح هجين) للقضبان الفولاذية والكربونية في تسليح الجوائز البيتونية المسلحة بطبقتين من القضبان وبحيث تتوضع القضبان الكربونية في الطبقة السفلى بينما تتوضع القضبان الفولاذية في الطبقة العليا ويؤدي ذلك إلى زيادة سماكة طبقة التغطية (وكمثال، في دراستنا هذه تزداد سماكة طبقة التغطية البيتونية في بعض العينات من 2 سم إلى 5.2 سم نتيجة استخدام هذه الطريقة في التسليح الهجين).

وسنركز في بحثنا هذا على دراسة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين (فولاذ+كربون) وبطبقتين من القضبان، وتتوضع القضبان الكربونية في بعض العينات ضمن الطبقة العليا بينما تتوضع في عينات أخرى ضمن الطبقة السفلى.

وتبين الدراسات السابقة [5] أن الجوائز البيتونية المسلحة تسليحا هجينا بقضبان فولاذية وأخرى من القضبان البوليميرية FRP يمكن أن تتهار بأحد الأشكال التالية:

- تحطم البيتون المضغوط ويحصل ذلك قبل حدوث تطاول في قضبان التسليح وتقصف قضبان ال FRP .
 - تطاول فولاذ التسليح ويتبعه تحطم البيتون المضغوط في حين أن قضبان ال FRP تبقى على حالها.
 - تطاول فولاذ التسليح ويتبعه انقطاع لهذه القضبان في حين تبقى قضبان ال FRP على حالها.
 - تطاول فولاذ التسليح ويتبعه تقصف في قضبان ال FRP.
- تعتمد أشكال الانهيار السابقة بشكل كبير على خواص المواد وتكوينها الأساسي وشكل مقطع الجائز، وكيفية التسليح ونسبه، ويبدو أن الشكل الأول للانهيار يحدث فقط في الجوائز المسلحة بشكل زائد (Over Reinforced) [6].
- تعرض هذه المقالة نتائج اختبارات أجريت خلال العامين 2011-2012 في مخابر جامعة روستوف الروسية لدراسة تأثير مكان توضع القضبان الكربونية ضمن مقاطع الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين وبطبقتين من القضبان. وهي جزء من بحث تجريبي كبير لدراسة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين، وذلك في إطار التعاون العلمي بين جامعة تشرين - كلية الهندسة المدنية وجامعة روستوف الحكومية للهندسة المدنية.

أهمية البحث وأهدافه:

إن عملية استبدال بعض القضبان الفولاذية أو كلها بقضبان كربونية في مقاطع العناصر البيتونية يسبب تغيراً كبيراً في سلوكها، وقد تكون عملية الاستبدال هذه ضرورية لأسباب تتعلق بالحماية من الصداً لوجود مواد ضارة بالفولاذ أو لتواجد العناصر الإنشائية في بيئة ملوثة أو بحرية. ومن هنا تبرز أهمية هذا البحث في:

- معرفة أيهما أفضل من الناحية الإنشائية وضع القضبان الكربونية في الطبقة السفلى أم العليا وذلك في العناصر المسلحة بطبقتين من القضبان العاملة.

- تسليط الضوء على سلوك العناصر البيتونية المسلحة بشكل هجين (فولاذ + كربون)، ولمساعدة المهندسين المصممين في فهم كيفية عمل هذه العناصر وخصوصيتها ويهدف بحثنا إلى ما يلي:

1-دراسة تأثير مكان توضع القضبان الكربونية ونسبة التسليح الكربونية على قدرات التحمل وأشكال الانهيار في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين وبطبقتين من القضبان العاملة.

- 2- إجراء مقارنة لقيم السهوم والتشوهات في وسط المجاز لمعرفة فاعلية هذا النوع من التسليح الهجين.
- 3- دراسة تأثير هذا النوع من التسليح الهجين على أشكال التشققات وعرضها وانتشارها في الجوائز المختبرة.
- 4- مقارنة منحنيات (حمولة- تشوه) في قضبان التسليح والبيتون المضغوط في الجوائز المختبرة.

طرائق البحث ومواده :

اعتمدت في هذا البحث الطريقة التجريبية لدراسة سلوك عدد من العينات المتماثلة في أبعادها وخصائص المواد المكونة لها وطريقة الاختبار، واختلفت في عاملين اثنين وهما: نسبة التسليح بقضبان كربونية ، . مكان توضع القضبان الكربونية ضمن المقطع. واتخذت العينات المسلحة بالفولاذ فقط كمرجعية لمقارنة سلوك العينات الأخرى بها. ومن خلال المقارنة المباشرة لقدرات التحمل والسهوم والتشوهات المختلفة في العينات تم التوصل إلى بعض النتائج والتوصيات.

البرنامج التجريبي والعينات المختبرة والمواد المستخدمة في تحضيرها:

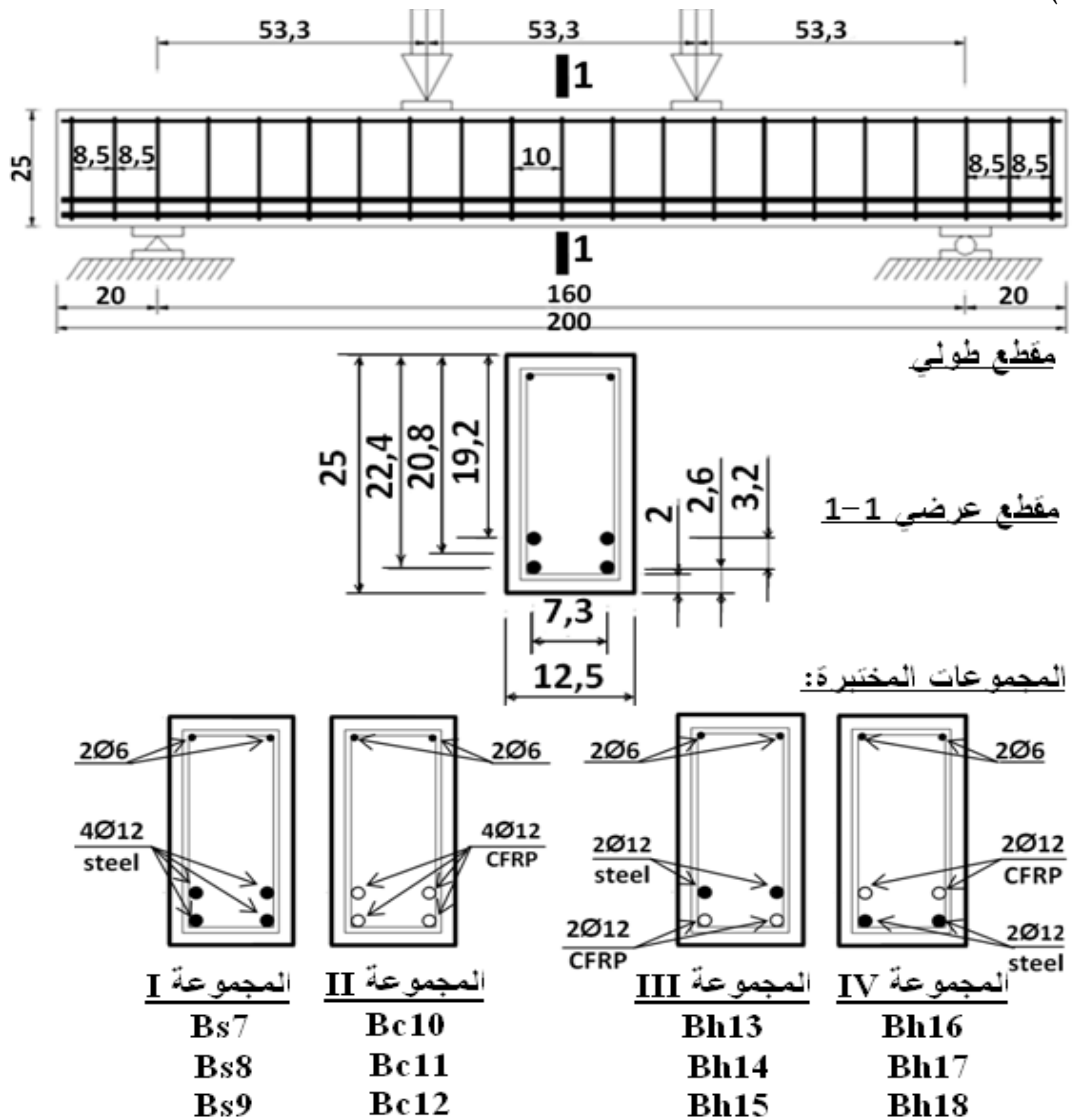
توصيف للجوائز المختبرة : Details of Tested Beams

تم تحضير واختبار 12 جائزا بيتونيا مسلحاً بأبعاد كل منها (12.5*25*200 سم)، وقسمت هذه الجوائز بحسب نسبة قضبان الكربون ومكان توضعها ضمن المقطع إلى أربع مجموعات، ويبين الجدول (1) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة وكيفية تسليحها وتسميتها وتقسيمها إلى مجموعات:

الجدول (1) مواصفات العينات المختبرة

متوسط المقاومة المميزة للبيتون f'_c MPa	نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية %	نسبة تسليح المقطع $\mu = \frac{A_{s,c}}{b \cdot h_0}$ %	نوع وعدد وقطر ومساحة قضبان التسليح ومكان توضعها ضمن طبقات التسليح		اسم الجوائز في المجموعة	رقم مجموعة الجوائز المختبرة ونوعها
			كربونية CFRP	فولاذية		
32.93	0	1.74%	-	4Ø12 4.52CM ² في كل طبقة قضبان	Bs7 Bs8 Bs9	I (معيارية تسليح بالفولاذ)
	100	1.74%	4Ø12 4.52CM ² في كل طبقة قضبان	-	Bc10 Bc11 Bc12	II (تسليح بالكربون)
	50	فولاذ=0.87% كربون=0.87%	2Ø12 2.26CM ² في الطبقة السفلى	2Ø12 2.26CM ² في الطبقة العليا	Bh13 Bh14 Bh15	III (تسليح هجين)
	50	كربون=0.87% فولاذ=0.87%	2Ø12 2.26CM ² في الطبقة العليا	2Ø12 2.26CM ² في الطبقة السفلى	Bh16 Bh17 Bh18	IV (تسليح هجين)

- تضم المجموعة الأولى (I) ثلاثة جوائز معيارية (Control Beams) متماثلة كل منها مسلحة بأربعة قضبان فولاذية Ø412 على شكل طبقتين (في كل طبقة قضبان والمسافة الشاقولية الصافية بين الطبقتين = 2سم وذلك بما يتوافق مع اشتراطات الكود العربي السوري) وتمت تسميتها (Bs7, Bs8, Bs9).
- وتضم المجموعة الثانية (II) ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة بأربعة قضبان كربونية CFRP 4Ø12 على شكل طبقتين (في كل طبقة قضبان) وتمت تسميتها (Bc10, Bc11, Bc12).
- أما المجموعة الثالثة (III) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيبين فولاذ Ø212 + قضيبين كربون Ø212 على شكل طبقتين (يتوضع قضيباً الكربون في الطبقة السفلية) وتمت تسميتها (Bh13, Bh14, Bh15).
- والمجموعة الرابعة (IV) فتضم ثلاثة جوائز متماثلة مسلحة تسليحاً هجيناً بقضيبين فولاذ Ø212 + قضيبين كربون Ø212 على شكل طبقتين (يتوضع قضيباً الكربون في الطبقة العلوية) وتمت تسميتها (Bh16, Bh17, Bh18).



الشكل (2) الأبعاد الهندسية وشكل التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة وفق المجموعات I-III-IV (الأبعاد بسم)

وسميت الجوائز بأحرف وأرقام لتدل على نوع قضبان التسليح، فالحرف الأول B (Beam)، والحرف الثاني يدل على نوع قضبان التسليح، ف S (Steel). أما C (Carbon) و h تعني تسليح هجين (hybrid فولاذ + كربون). والرقم الذي يلي ذلك يدل على تسلسل الجائز ضمن مجموعته وضمن خطة البحث بشكل عام. ويبين الشكل (2) الأبعاد الهندسية وشكل ونوع التسليح الطولي والعرضي للجوائز المختبرة وفق المجموعات I-III-IV.

المواد المستخدمة في تحضير الجوائز:

البيتون: الجوائز المختبرة أعدت من البيتون وفق نسب الخلط المبينة في الجدول (2) وتم الحصول على مقاومة مميزة على الضغط تساوي وسطيًا (32.93 MPa)، باستخدام الاسمنت البورتلاندي المصنع في معمل "بروليتاريا" في مدينة نوفاراسيسك الروسية، أما البحص المستخدم فهو ذو تدرج (25-10 mm) والرمل كوارتزي ناعم. أما عملية تصلب البيتون فتمت في ظروف نظامية في مخبر البيتون المسلح لدى جامعة روستوف.

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

المادة	الإسمنت	البحص	الرمل	الماء
الوزن (KG)	450	1270	460	207

قضبان التسليح الكربونية CFRP:

استخدمت قضبان كربونية CFRP بقطر 12 ملم وهي أمريكية الصنع وعولج السطح في مراحل صناعة القضبان بحيث ينتج سطح محلزن ولصق عليه رمل وذلك لزيادة تماسكه بالبيتون. وضعت الخصائص الميكانيكية لقضبان CFRP في الجدول (3).



الشكل (3) شكل قضبان التسليح الفولاذية والكربونية CFRP بقطر 12 ملم

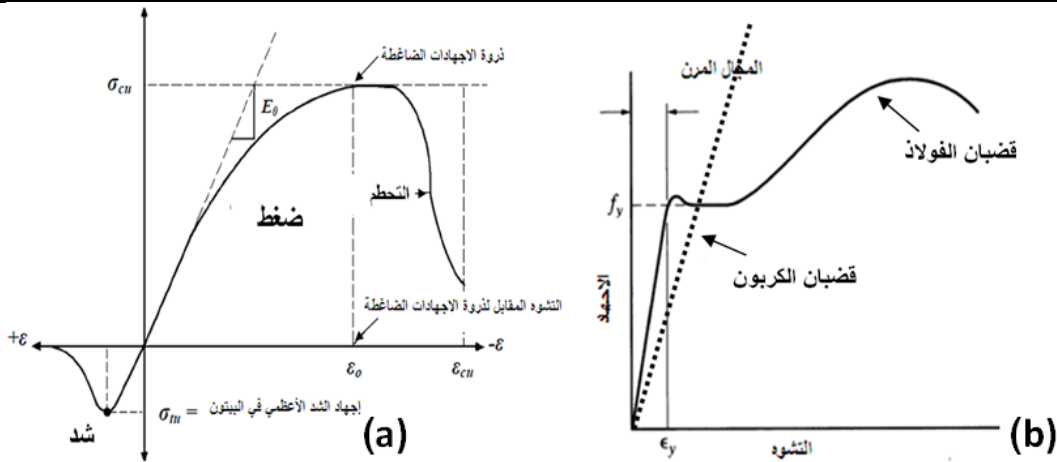
قضبان التسليح الفولاذية Steel reinforcing bars:

استخدمت قضبان فولاذية ملساء بقطر 6 ملم من نوع B500 للتسليح العرضي والعلوي ويتباعد للأساور يساوي 10 سم، أما التسليح السفلي فاستخدمت قضبان فولاذية محلزنة بقطر 12 ملم من نوع A600. ويبين الجدول (3) الخصائص الميكانيكية لمختلف قضبان التسليح الفولاذية المستخدمة وجميعها روسية الصنع (وتجدر الإشارة إلى أن تسميات فولاذ التسليح المستخدم في هذا البحث B500 و A600 تتوافق مع التسميات الحديثة المعتمدة في المراجع الروسية [7]، حيث إن الرقم المرافق للاسم يدل على قيمة إجهاد الخضوع)، ويظهر الشكل (3) التباين في شكل

القضبان الكربونية والفولاذية المستخدمة. ويبين الشكل (4) المخططات النموذجية لقوانين سلوك المواد المستخدمة، كما يظهر الشكل (5) صوراً لهياكل التسليح في كل مجموعة من الجوائز المختبرة.

الجدول (3) مواصفات قضبان التسليح الفولاذية والكربونية المستخدمة في تسليح الجوائز المختبرة **Mechanical properties**.

معامل المرونة Modulus of Elasticity (GPa)	إجهاد الخصوع yielding strength (MPa)	المقاومة على الشد Tensile strength (MPa)	القطر \varnothing (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 (4) قوانين السلوك للمواد المستخدمة، a- مخطط (إجهاد- تشوه) البيتون، b- مخطط (إجهاد- تشوه) للقضبان الفولاذ والكربون.

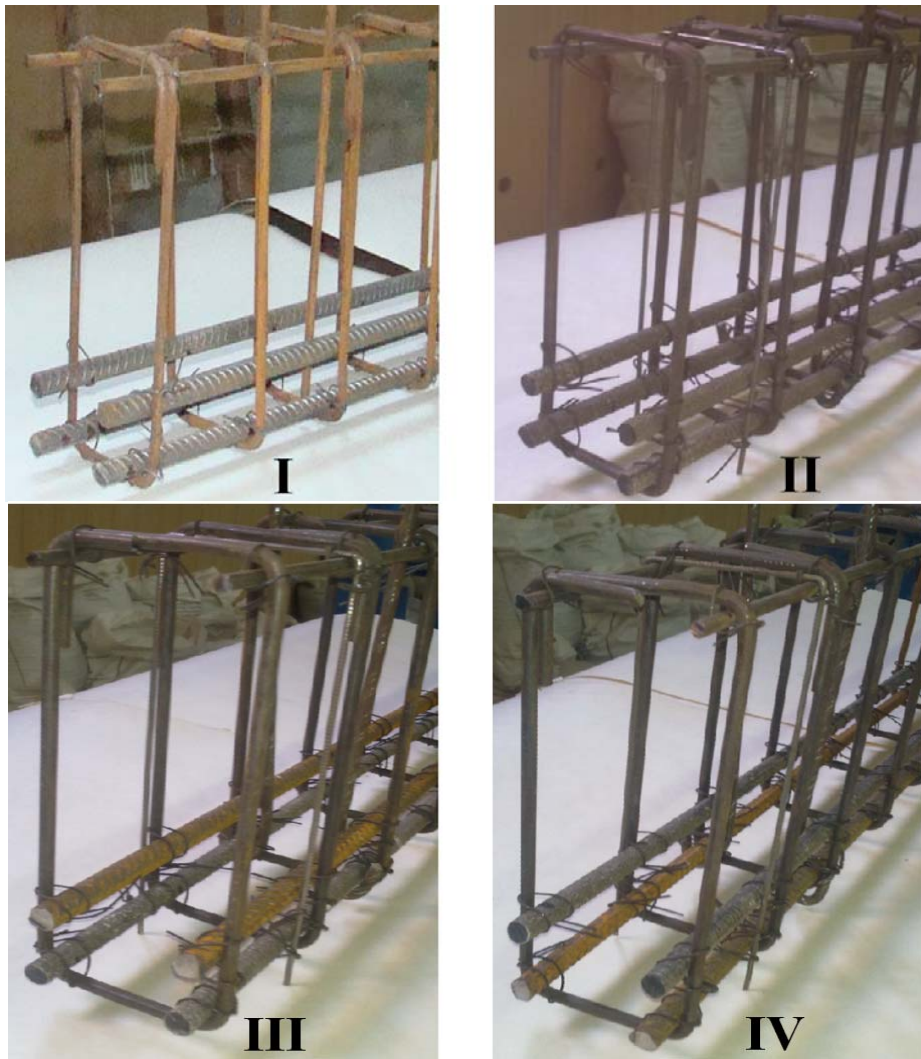
الإجراءات المتبعة والتجهيزات المستخدمة في اختبار الجوائز:

اختبرت الجوائز حسب الشكل (6) كجوائز بسيطة الاستناد تحت تأثير حملتين مركزيين في ثلث طول مجاز الجوائز المساوي (160cm)، 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 (7) وبدفعات تحميل متزايدة (4 و 8 و 16 KN)، وبعد كل دفعة تحميل كانت فترة انتظار تساوي 10 دقائق (وفق الطريقة الروسية في اختبار الجوائز)، حيث أخذت القراءات مرتين بعد التحميل مباشرة ثم بعد فترة الانتظار واعتمد أخيراً متوسط القراءتين. استخدمت حساسات تشوه (داتشكا) خاصة بالبيتون ذات طول (50 mm) لرصد التشوه الحاصل في البيتون المضغوط، ولقياس التشوه في القضبان استخدمت حساسات تشوه خاصة بالقضبان بطول (10 mm) وهي مبينة في الشكل (8) وبعد أن تم لصق هذه الحساسات على القضبان وصلت بالأسلاك الكهربائية المناسبة وعزلت

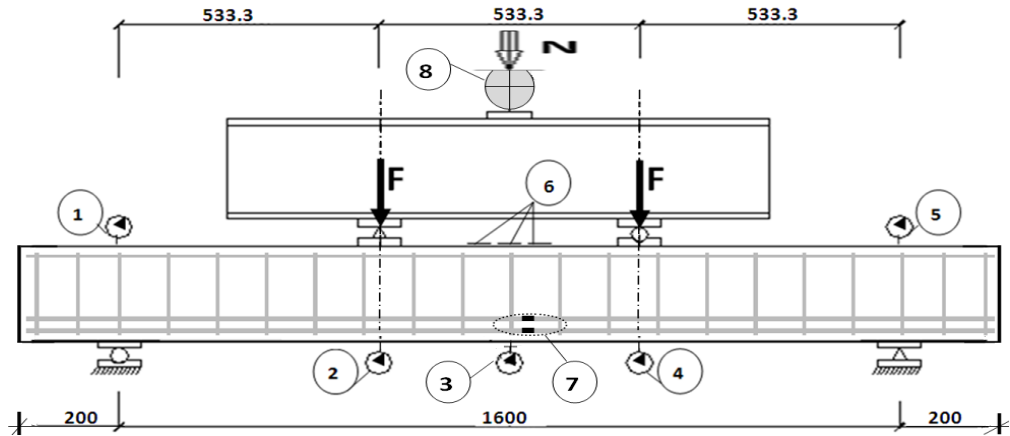
لحمايتها من الرطوبة في أثناء عملية الصب، ووصلت أسلاك الحساسات إلى محطة قياس التشوهات وهي من طراز (Ostroestva izmeritelna-Obravlaushe OIO 2002).

تم قياس السهوم والانتقالات في الجوائز المختبرة باستخدام ساعات قياس السهوم وعددها خمسة كما في الشكلين (6 و7) حيث 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 والحمولات الموافقة لها. واختبرت الجوائز بعمر يتراوح من 10 إلى 11 شهراً.



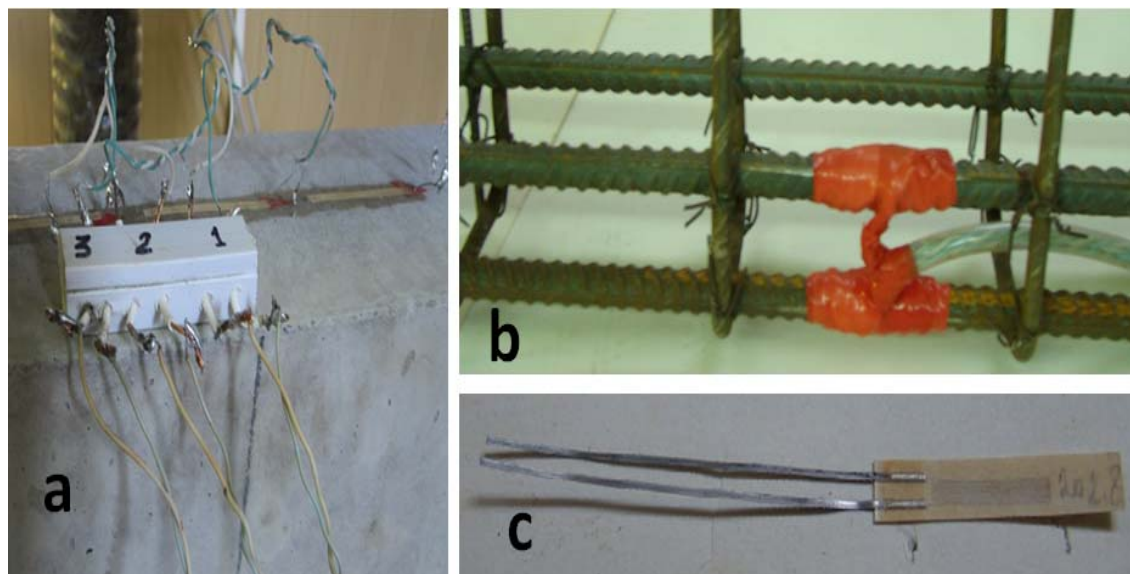
الشكل (5) شكل هياكل التسليح لمجموعات الجوائز المختبرة I- II- III- IV.



الشكل (6) مخطط عام للجوائز المختبرة يبين مكان توضع مقاييس التشوه والحساسات وموزع الحمولة وكيفية الاستناد. 1-2-3-4-5 مقاييس انتقال ساعة، 6 - مكان لصق حساسات التشوه على السطح البيتوني في منتصف منطقة الضغط، 7 - مكان لصق حساسات التشوه على قضبان التسليح في منطقة الانعطاف الصافي، 8- خلية التحميل (ديناموميتر) وهي تفصل بين المكبس الهيدروليكي وموزع الحمولة.



الشكل (7) شكل جهاز التحميل ومحطة قياس التشوهات طراز (Ostroestva izmeritelna-Obravlaushe OIO2002) المستخدمة في اختبار الجوائز في جامعة روستوف الحكومية في روسيا.



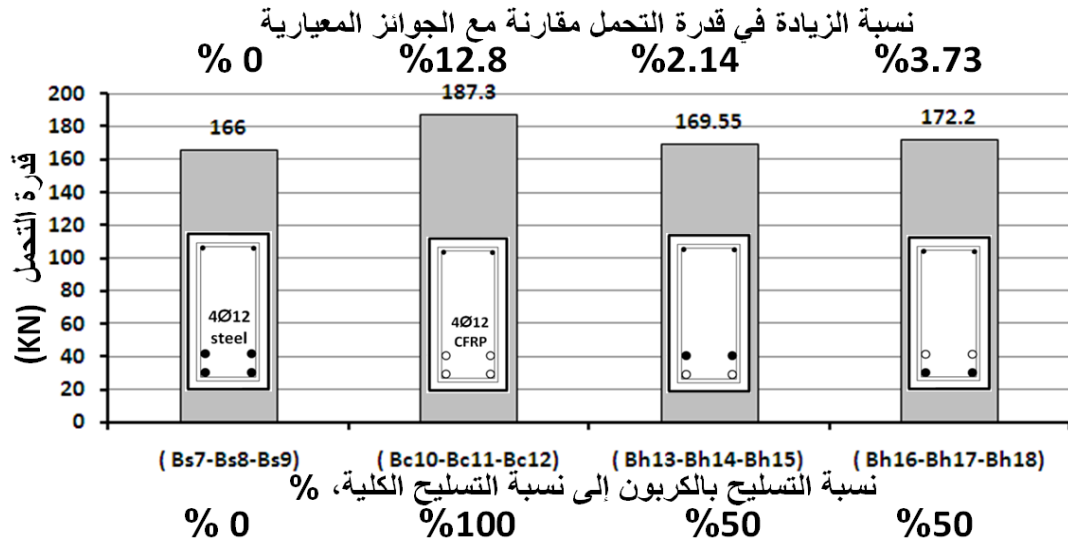
الشكل (8) a - لصق حساسات تشوه البيتون في منطقة الضغط، b- عزل حساسات التشوه المصوقة على قضبان التسليح لحمايتها من الرطوبة أثناء الصب، c- شكل الحساسات المستخدمة لقياس تشوه القضبان.

النتائج والمناقشة:

مقاومة الجوائز على الانعطاف Moment capacity :

يبين الجدول (4) قدرات التحمل القصوى للجوائز البيتونية المسلحة بالفولاذ أو الكربون أو الاتنين معا (تسليح هجين)، ومنة يتبين أن استبدال القضبان الفولاذية بقضبان كربونية يؤدي إلى زيادة في قدرات التحمل الأعظمية، وأن الجوائز المعيارية المسلحة بطبقتين من الفولاذ (المجموعة I) كانت الأقل تحملاً (166 KN)، في حين أن الجوائز المسلحة بطبقتين من الكربون (المجموعة II) كانت الأكثر تحملاً (187.3 KN) أي بزيادة تساوي 12.8% مقارنة مع الجوائز المعيارية. أما الجوائز المسلحة بشكل هجين في المجموعة (III) حيث القضبان الكربونية تتوضع تحت الفولاذية فقد زادت قدرة التحمل بشكل طفيف وبلغت قدرة تحملها (169.55 KN) أي بزيادة تساوي 2.14% مقارنة مع الجوائز المعيارية. وفيما يتعلق بالجوائز المسلحة بشكل هجين في المجموعة (IV) حيث القضبان الكربونية تتوضع فوق الفولاذية فقد زادت قدرة التحمل بشكل طفيف أيضا وبلغت قدرة تحملها (172.2 KN) أي بزيادة تساوي 3.73% مقارنة مع الجوائز المعيارية.

ويبين الشكل (9) أن قدرة التحمل في الجوائز البيتونية المختبرة (المجموعة II) ازدادت (من 0 إلى 12.8%) مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية فيها من (0 إلى 100%)، (تعتبر الجوائز المسلحة بالفولاذ معيارية ونسبة التسليح بالكربون فيها = 0%). وقدرة التحمل في جوائز المجموعتين (III و IV) ازدادت وفق النسب (2.14-3.73%) بالتتالي، وذلك مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية فيها من (0 إلى 50)%. وان تأثير تبادل القضبان الكربونية والفولاذية مواقعهما على قدرة التحمل لم يتجاوز 1.59%. وفي نفس الجدول (4) عرضت أشكال الانهيار الحاصلة في الجوائز المختبرة وتبين النتائج أن جميع الجوائز البيتونية المعيارية المسلحة بالفولاذ (المجموعة I) انهارت نتيجة تطاول قضبان التسليح الطولية مع بداية تحطم في البيتون المضغوط، وكذلك انهارت جوائز المجموعتين (III و IV) المسلحة بنسبة 50% كربون، أما الجوائز البيتونية المسلحة بالكربون بنسبة (100% أي المجموعة II) فإنها انهارت نتيجة تحطم البيتون المضغوط. ويظهر هذا جلياً على الشكل (12).



الشكل (9) العلاقة بين قدرة تحمل الجوائز و(نسبة التسليح بالكربون إلى نسبة التسليح الكلية)، و(مكان توزيع القضبان الكربونية في المقطع المسلح بطبقتين من القضبان).

الجدول (4) مقارنة قدرات تحمل الأعمدة للجوائز المختبرة وأشكال انهيارها

شكل الانهيار في الجوائز modes of failure	نسبة الزيادة في قدرة التحمل بالنسبة للجوائز المعيارية (المسلحة بالفولاذ) %	قدرة التحمل القصوى P_{max}^{exp} ultimate load (KN)		أسم الجوائز	نوع قضبان التسليح ومكان توزيعها	مجموعة الجوائز المختبرة
		قيمة وسطية	قيمة تجريبية			
تداول قضبان التسليح الفولاذية	0	166	167.6	Bs7	فولاذية على طبقتين	I
			167.5	Bs8		
			163	Bs9		
تحطم البيتون المضغوط	12.8	187.3	188.2	Bc10	كربونية على طبقتين	II
			186.6	Bc11		
			185.1	Bc12		
تداول قضبان التسليح الفولاذية	2.14	169.55	170.97	Bh13	فولاذ في الطبقة هجينة العلوية+ كربون في الطبقة السفلية	III
			169.48	Bh14		
			168.2	Bh15		
تداول قضبان التسليح الفولاذية	3.73	172.2	171.5	Bh16	فولاذ في الطبقة السفلية + كربون في الطبقة العلوية هجينة	IV
			171.9	Bh17		
			173.2	Bh18		

مقارنة قيم السهوم وسط الجوائز المختبرة:

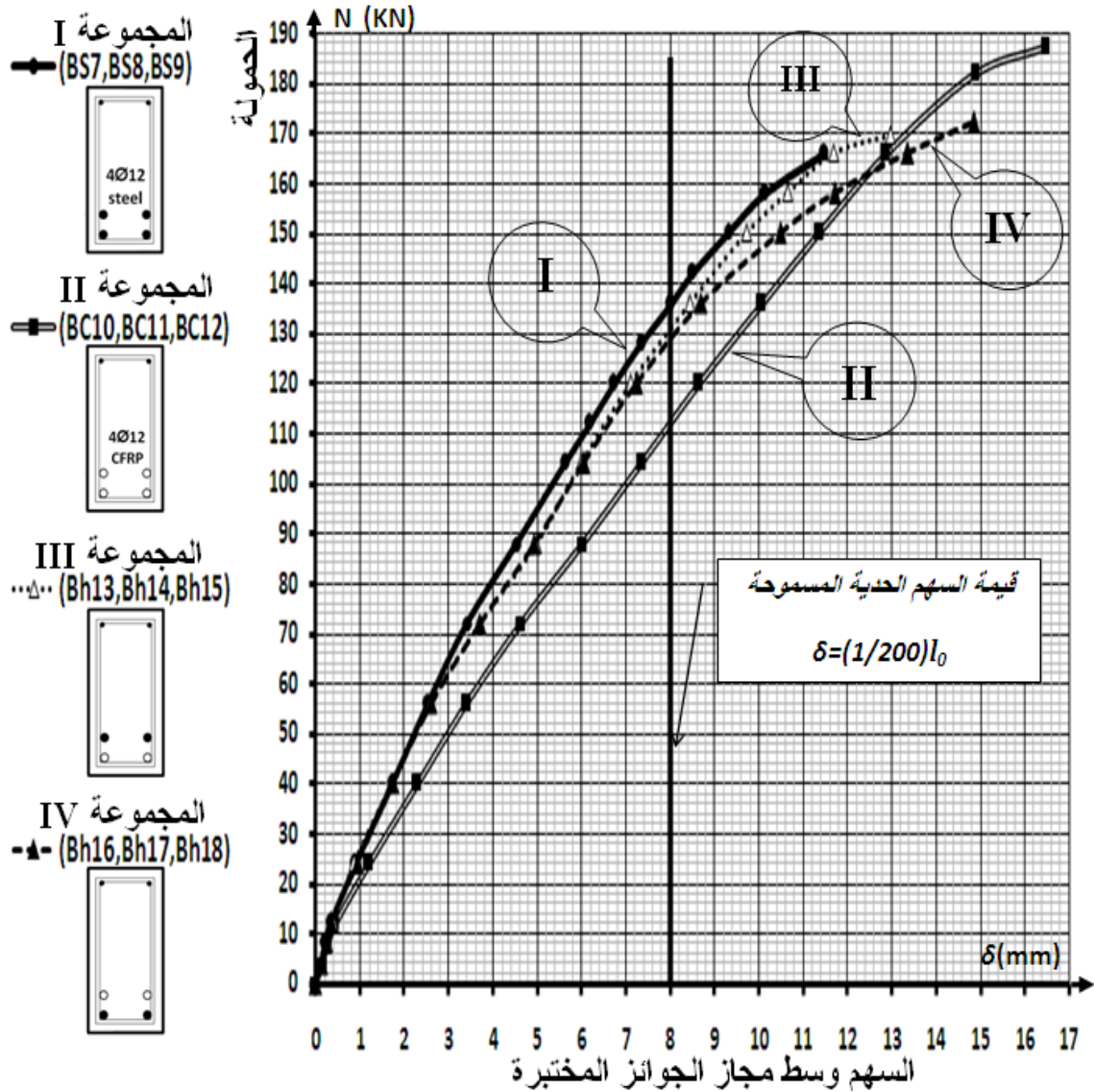
يبين الجدول (5) مقارنة قيم السهوم الأعظمية في وسط المجاز للجوائز المختبرة، ويظهر على الشكل (10) مقارنة بين منحنيات (حمولة- سهم) في وسط مجاز الجوائز المختبرة، حيث رسم مخطط (حمولة- سهم) الناتج عن قيمة السهم الوسطية الناتجة من ثلاثة جوائز في كل مجموعة. ومنها نستنتج أن الجزء الخطي الأول من المنحنيات (حتى مستوى التحميل 13 KN) كان متشابهاً تقريباً لجميع الجوائز وفي نهاية المرحلة الخطية الأولية 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 و أن التناقص في صلابة الجوائز كان مختلفاً.

ومن الشكل (10) أيضاً يتبين أن السهوم في الجوائز الحاوية قضبان كربونية تزداد بشكل مفاجئ بعد تشكل الشقوق الشاقولية وأن درجة ميلان المنحني تتناسب طرذاً مع ازدياد عدد قضبان الكربون في المقطع، ففي جوائز المجموعة الثانية II (Bc10, Bc11, Bc12) حيث التسليح بالكربون بنسبة 100% كانت درجة الميلان أعظمية ويتخذ المنحني شكلاً مستقيماً إلى نهاية التحميل مع وجود انحناء بسيط لحظة الانهيار.

في جوائز المجموعتين III (Bh13, Bh14, Bh15) و IV (Bh16, Bh17, Bh18) المسلحة بشكل هجين يكون المنحني (حمولة- سهم) متماثل حتى الحمولة (130 KN) أي (حتى مستوى تحميل يعادل 75% من حمولة الانهيار للمجموعتين) بعد ذلك يصبح ميل منحني المجموعة IV أكبر حتى لحظة الانهيار مبيناً زيادة في السهم أكبر بـ 14.4% عما هو عليه في المجموعة III. وفي جوائز المجموعة المعيارية I كان ميل المنحني (حمولة- سهم) أصغرياً مقارنة مع بقية المجموعات.

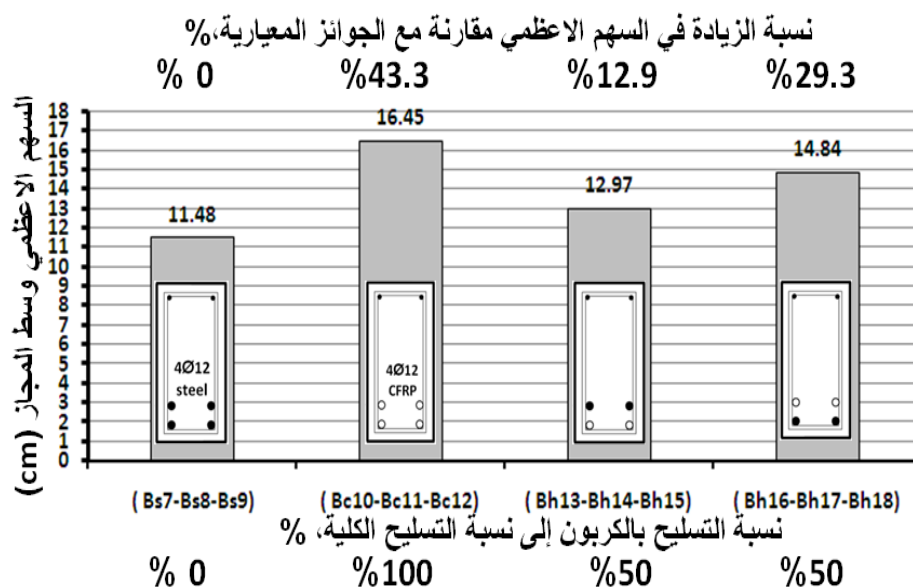
الجدول (5) مقارنة قيم السهوم الأعظمية في وسط مجاز الجوائز المختبرة والناتجة عن حمولات الانهيار، ومقارنة لعدد وتباعد وطول الشقوق في منطقة الانعطاف الصافي.

مجموعة الجوائز المختبرة	أسم الجوائز	قيمة السهم الأعظمية في وسط المجاز δ_{max}^{exp} (mm)		نسبة الزيادة في قيمة السهم بالنسبة للجوائز المعيارية (المسلحة بالفولاذ) %	متوسط عدد الشقوق في منطقة الانعطاف الصافي	متوسط المسافة بين الشقوق (CM)	متوسط طول الشق الشاقولي في منطقة الانعطاف الصافي (CM)
		قيمة وسطية	قيمة تجريبية				
I	Bs7	11.84	11.48	0	7	8.9	16.6
	Bs8	11.51					
	Bs9	11.10					
II	Bc10	17.19	16.45	43.3	11	5.3	18.8
	Bc11	16.13					
	Bc12	16.04					
III	Bh13	13.31	12.97	12.9	9	6.7	17.3
	Bh14	12.79					
	Bh15	12.83					
IV	Bh16	14.60	14.84	29.3	8	7.6	17.7
	Bh17	14.65					
	Bh18	15.29					



الشكل (10) منحنيات (حمولة - سهم) (Load-deflection) لمجموعات الجوائز المختبرة I - II - III - IV ، وهي مأخوذة كمتوسط القيمة لثلاثة جوائز في كل مجموعة.

ولتحليل النتائج المتعلقة بالسهم لا بد من الأخذ بالحسبان الحدود القصوى المسموحة للسهم وسط المجاز وهي تساوي $f = \frac{1}{200}l_0$ حسب الكود الروسي وفي جوائزنا هذه القيمة تساوي 8 ملم، و l_0 = طول مجاز الجوائز وهو يساوي 160 سم. وعند مقارنة الحملات المسببة لهذه القيمة على منحنيات (حمولة - سهم) المبينة في الشكل (10) نلاحظ أن الجوائز المسلحة بالكامل بالكربون (المجموعة II) يصل السهم الحدي المسموح إلى هذه القيمة عند الحمولة (112 KN) أما الجوائز المسلحة بنسبة 50% بقضبان كربونية (المجموعتين III و IV) فيصل السهم الحدي المسموح إلى هذه القيمة عند الحمولة (130 KN)، في حين يصل السهم الحدي المسموح في الجوائز المعيارية إلى هذه القيمة عند الحمولة (136 KN). ويبين الشكل (11) تغير قيمة السهم الأعظمي وسط المجاز مع (تغير نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المختبرة)، و(تغير مكان توزيع قضبان الكربون في المقطع).



الشكل (11) العلاقة بين قيمة السهم الأعظمي وسط المجاز و(تغير نسبة التسليح بالكربون في الجوائز المختبرة)، و(تغير مكان توضع قضبان الكربون في المقطع).

مقارنة شكل التشققات وانتشارها وارتفاعها وعرضها في الجوائز المختبرة:

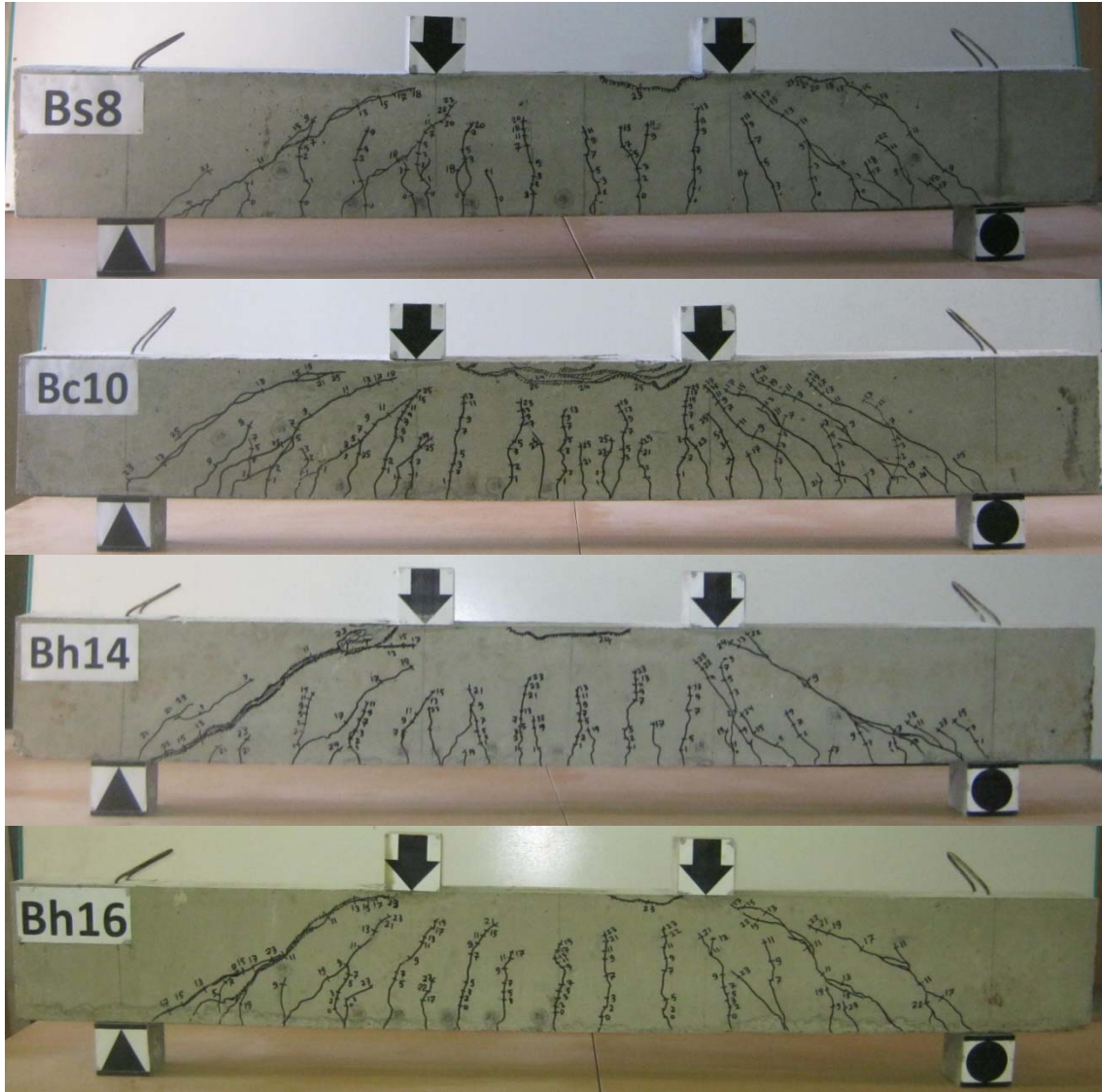
يبين الشكل (12) صوراً لأربعة جوائز (حيث تم اختيار جوائز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة I-III-IV) وتظهر عليها أشكال التشققات Crack Pattern وانتشارها، ومنها نستنتج أن عدد التشققات وارتفاعها يزداد مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية.

ونلاحظ أن المسافة بين التشققات تتناقص مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية، فعند رصد منطقة الانعطاف الصافي بطول 53.3 سم تبين أن متوسط عدد الشقوق يزداد من 7 شقوق في الجوائز المعيارية (المجموعة I) إلى 11 شق في الجوائز التي يحوي تسليحها أربعة قضبان كربونية (المجموعة II)، وإلى 9 شقوق في الجوائز التي يحوي تسليحها قضيبين كربون في الطبقة السفلية (المجموعة III)، ثم إلى 8 شقوق في الجوائز التي يحوي تسليحها قضيبين كربون في الطبقة العلوية (المجموعة IV).

ومن الجدول (5) نلاحظ أن متوسط المسافة بين الشقوق تتناقص من 8.9cm في جوائز المجموعة (I) إلى (5.3cm) في جوائز المجموعة (II)، ثم إلى (6.7cm) في جوائز المجموعة (III) وإلى (7.6cm) في جوائز المجموعة (IV).

نلاحظ من الشكل (12) أيضاً أن متوسط ارتفاع الشق في منطقة العزم الصافي يزداد مع ازدياد نسبة التسليح بالكربون فمن اجل المجموعات التالية: (I-III-IV) يكون متوسط ارتفاع الشق مساوياً للقيم التالية: (16.6-17.3-17.7-18.8) سم بالتتالي.

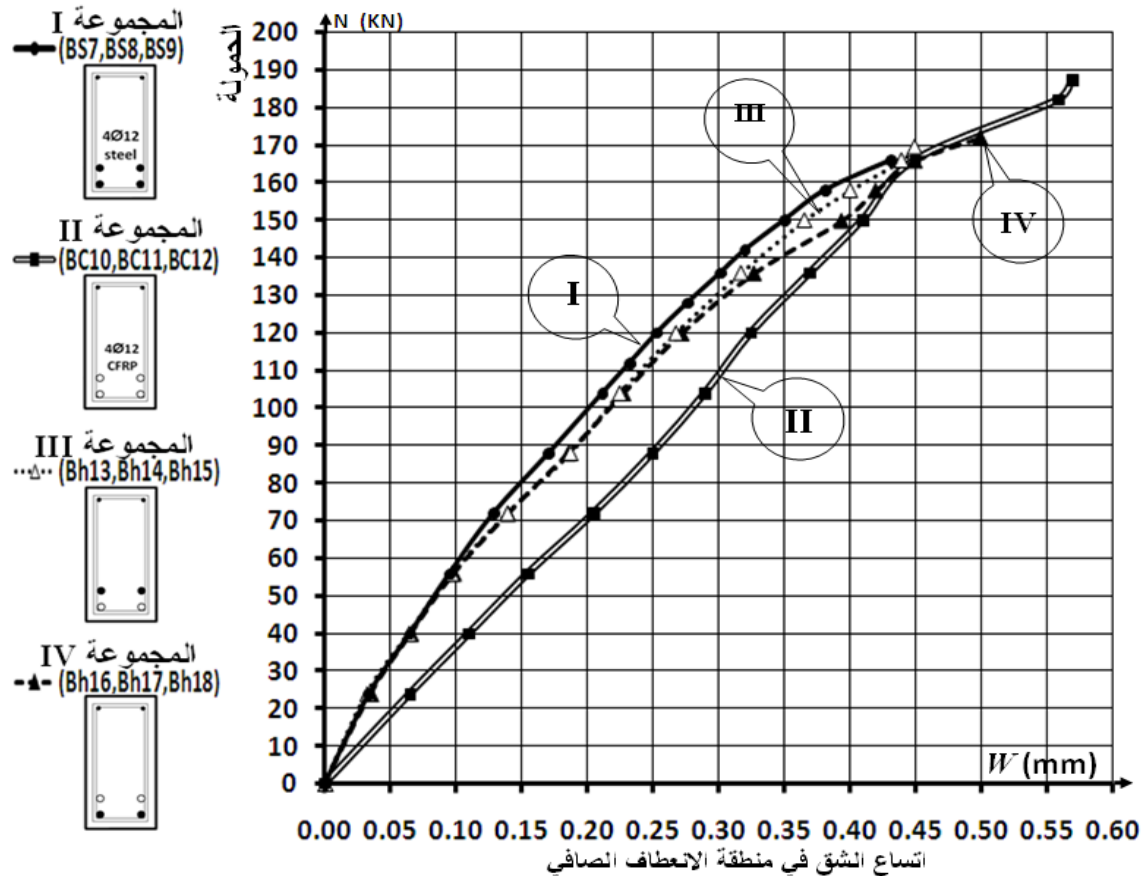
وتجدر الإشارة إلى التشققات في الجوائز المسلحة بقضبان كربونية بشكل كلي أو جزئي تغلق بعد إزالة الحمولة عنها بشكل كامل نظراً للمرونة العالية للقضبان الكربونية. وفي الجوائز المسلحة بالكربون بشكل كامل نلاحظ ظهور من 3 إلى 4 شقوق طويلة ومائلة في منطقتي القص وهي تميل تقريبا بنفس الزاوية بالإضافة لظهور عدد من الشقوق الصغيرة المائلة في هاتين المنطقتين.



الشكل (12) أشكال التشققات وانتشارها في الجوائز المختبرة حيث تم اختيار جانز عن كل مجموعة من الجوائز المختبرة ((Bs7, Bs8, BS9):I) ، ((Bc10, Bc11, Bc12): II) ، ((Bh13, Bh14, Bh15):III) ، ((Bh16, Bh17, Bh18):IV) ،

ومن الشكل (13) نلاحظ على الجزء الأول من المنحنيات أن اتساع الشق في جوائز المجموعة (II) المسلحة بنسبة 100% كربون من مساحة تسليحها هو الأكبر على كامل مجال التحميل، والمنحني يتخذ شكلاً مستقيماً، وأن جوائز المجموعتين (III) و (IV) المسلحة بنسبة 50% كربون من مساحة تسليحها كانت متماثلة في اتساع الشق إلى مستوى تحميل 130 KN ، وبعده أصبحت الشقوق في جوائز المجموعة (IV) أوسع إلى لحظة الانهيار. أما اتساع الشق في الجوائز المعيارية فكان الأقل على كامل مجال التحميل.

وفي جوائز المجموعتين (II) و (IV) نلاحظ على الجزء الأخير من منحنياتها توقف أو تباطؤ في اتساع الشقوق وذلك بسبب تشكل الشقوق المائلة واتساعها على حساب الشقوق الشاقولية وبسبب تشكل شقوق جديدة.

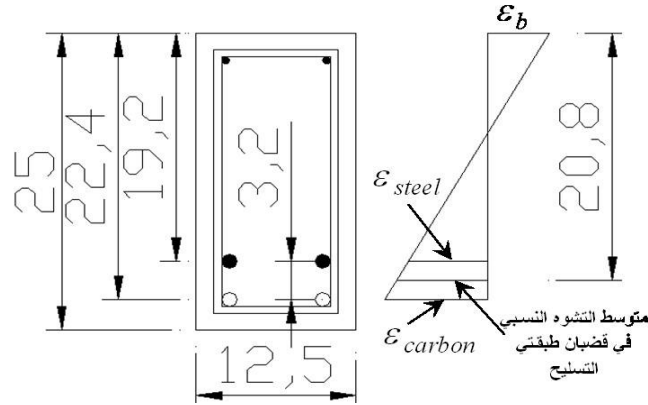


الشكل (13) منحنيات (حمولة - اتساع الشق) (Load-crack width relationship) لمجموعات الجوائز المختبرة I- II- III- IV وهي مأخوذة كمتوسط القيمة لثلاث جوائز في كل مجموعة.

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

Load-strain variation in reinforcement and concrete

كما ذكر سابقا 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 العلوية والسفلية، ويبين الشكل (14) توزيع التشوهات النسبية في البيتون المضغوط وقضبان طبقتي التسليح.

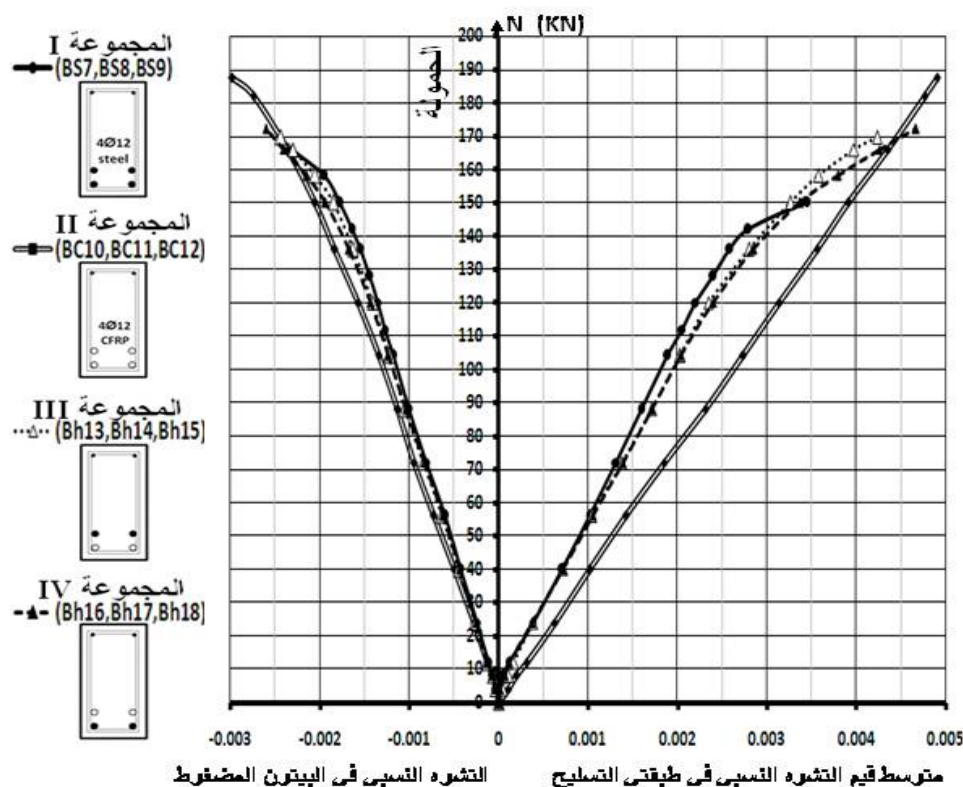


الشكل (14) توزيع التشوهات النسبية في المقطع المسلح بشكل هجين و بطبقتين من القضبان (الأبعاد ب سم)

ومن الجدول (6) يتبين أن البيتون المضغوط في مجموعة الجوائز II تحطم بعد أن تجاوزت قيمة التشوه النسبي القيمة (0.0029)، في حين أن التشوه النسبي في مجموعة الجوائز المعيارية I ومجموعتي الجوائز III و IV أخذ القيم التالية (0.0023-0.0024-0.0026) بالتتالي، ولوحظ فيها بداية لتحطم البيتون المضغوط. ومن نفس الجدول يتبين أن التشوه النسبي في قضبان تسليح المجموعة II يكون أعظماً، أما في قضبان المجموعة المعيارية I يكون أصغرياً. وتظهر على الشكل (15) مقارنة لمنحنيات (حمولة - تشوه) حيث أخذ متوسط قيم التشوه في قضبان طبقتي 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 نفس الحمولة. كما أن القضبان الكربونية تتشوه بشكل خطي إلى لحظة حصول الانهيار.

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 تسليح الطبقة العلوية والسفلية	
- 0.0023	في القضبان العلوية 0.0032 (عند الحمل 150 KN) في القضبان السفلية 0.0036	I (معيارية تسليح بالفولاذ)
- 0.0029	في القضبان العلوية 0.0045 في القضبان السفلية 0.0053	II (تسليح بالكربون)
- 0.0024	في القضبان العلوية الفولاذية 0.0042 في القضبان السفلية الكربونية 0.0043	III (تسليح هجين)
- 0.0026	في القضبان العلوية الكربونية 0.004 في القضبان السفلية الفولاذية 0.005	IV (تسليح هجين)



الشكل (15) مقارنة بين منحنيات (حمولة - تشوه) في قضبان التسليح، حيث أخذ متوسط قيم التشوه النسبي في طبقتي التسليح)،
(وحمولة - تشوه) في البيتون المضغوط) لمجموعات الجوائز المختبرة I - II - III - IV .

ويتخذ منحنى (حمولة - تشوه) منحناً خطياً في قضبان التسليح (للمجموعة II) من بداية التحميل وحتى لحظة الانهيار. وتتماثل جوائز المجموعتين (III و IV) في قيم التشوه الحاصلة بالقضبان والبيتون حتى مستوى التحميل (130 KN) بعده تصبح التشوهات في المجموعة (III) أكبر حتى لحظة الانهيار.

الاستنتاجات والتوصيات:

عند إجراء مقارنة مباشرة لقيم التحمل الأعظمية وقيم السهوم وشكل التشققات وانتشارها وعرضها وارتفاعها في الجوائز المختبرة والمسلحة على شكل طبقتين ووفق أماكن توضع ونسب تسليح مختلفة لقضبان الفولاذ والكرتون يمكن كتابة النتائج التالية:

1- إن إضافة قضبان كربونية إلى جانب القضبان الفولاذية في تسليح مقاطع العناصر البيتونية يؤدي إلى زيادة في قدرات تحملها غير أنها تصبح أكثر قابلية للتشوه (سهوم أكبر وتشققات أكثر) بالمقارنة مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ فقط. وعندما تزداد (نسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية) في الجوائز البيتونية المسلحة بشكل هجين وبطبقتي تسليح وفق النسب التالية: (0-50-100) %، تزداد قدرات تحملها وفق النسب (0 - 2.9 - 12.8) % بالتتالي.

2- إن تواجد القضبان الكربونية في طبقة التسليح السفلية والقضبان الفولاذية في الطبقة العلوية يؤدي إلى زيادة في قدرة التحمل بمقدار (2.14%) مقارنة مع الجوائز المعيارية، وعندما تتبادل القضبان الكربونية والفولاذية مكان توضعها، تصبح الزيادة في قدرة التحمل مساوية (3.73%).

- 3- إن إضافة قضبان كربونية إلى جانب القضبان الفولاذية في تسليح مقاطع العناصر البيتونية يؤدي إلى زيادة قيم السهم في وسط المجاز و يزداد ميل منحنيات حمولة - سهم مع ازدياد نسبة التسليح بقضبان كربونية.
- 4- تبقى قيم السهوم والتشوهات النسبية الحاصلة في جوائز المجموعتين (III - IV) متماثلة إلى مستوى تحميل يساوي 75% من قدرات تحملها، بعد ذلك تصبح جوائز المجموعة (IV) أكثر تشوها إلى لحظة الانهيار. ويؤدي الاستخدام المشترك للقضبان الكربونية والفولاذية في تسليح الجوائز البيتونية إلى زيادة ملحوظة في عدد التشققات وتناقص للمسافة بينها وزيادة في طولها، وذلك بالمقارنة مع الجوائز المعيارية المسلحة بالفولاذ فقط.
- 5- تتناسب قيمة التشوه النسبي في قضبان التسليح والبيتون المضغوط طردا مع ازدياد (نسبة التسليح بقضبان كربونية إلى نسبة التسليح الكلية)، وانهارت جوائز المجموعة (II) التي تجاوز التشوه النسبي في بيتونها القيمة (0.0029) نتيجة تحطم البيتون المضغوط فيها.
- 6- ينصح باستخدام القضبان الكربونية بشكل كلي أو جزئي (تسليح هجين) في تسليح العناصر البيتونية المعرضة لقدر كبير من التلوث أو الملوحة، وفي حالة التسليح بطبقتين ننصح بوضع القضبان الكربونية في الطبقة السفلى بالقرب من سطح العناصر، حيث يعطينا ذلك إمكانية لزيادة سماكة طبقة التغطية البيتونية الخاصة بالقضبان الفولاذية الواقعة في الطبقة العلوية لحمايتها من الصدأ.

المراجع:

- [1]- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE.ACI, *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*. ACI 440.1R-06, Detroit. 2006.
- [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]- 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.
- [4]- SAADATMANESH, H.; EHSANI, M.R. *Fiber composite bar for reinforced concrete construction*. J. Compos. Mater., U.S.A., VOL.25, 1991.188-203.
- [5]- 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.
- [6] - NAWY, E.G.;NEUWERTH,G.E. *Fiberglass reinforced concrete slabs and beams*. J. Struct. Div., U.S.A., VOL.103(ST2),1977.400-421.
- [7]- СП 52-101. *Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры*. Москва.2003.