

أثر مقاومة الخرسانة وكمية التسليح العرضي على فعالية تقوية الجوائز الخرسانية المسلحة المستمرة على القص بشرائح CFRP

**عبد الحميد كيخيا

*حسن العطار

(الإيداع: 3 أيلول 2018 ، القبول: 9 كانون الثاني 2018)

الملخص:

ترتبط فعالية تقوية الجوائز الخرسانية المسلحة المستمرة على القص بشرائح الـ CFRP (البوليمرات المسلحة بالألياف الكربونية) بعوامل عديدة منها ما يتعلق بالخصائص الميكانيكية والبعدية للشرائح، ومنها ما يتعلق بالجوائز كالمقاومة المميزة للخرسانة وكمية التسليح العرضي. باستخدام طريقة العناصر المحدودة والتحليل اللاخطي الذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة تم القيام بدراسة تحليلية رقمية لجوائز خرسانية مسلحة ومستمرة مقواة على القص بشرائح الـ CFRP، وإجراء دراسة بارامترية لدراسة أثر مقاومة الخرسانة وكمية التسليح العرضي على فعالية تقوية هذه الجوائز على القص بشرائح الـ CFRP. بين هذا البحث أن فعالية شرائح الـ CFRP في تقوية الجوائز البيوتونية المسلحة المستمرة على القص تزداد عند انخفاض قدرة تحمل هذه الجوائز للقوة القاصة بدون تقوية، حيث تزداد هذه الفعالية عند انخفاض المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة وعند انخفاض كمية التسليح العرضي للجوائز.

الكلمات المفتاحية: البوليمرات المسلحة بالألياف الكربونية (CFRP) -جوائز مستمر-خرسانة مسلحة -تقوية على القص - طريقة العناصر المحدودة -تحليل لا خطي.

* طالب ماجستير -قسم الهندسة الإنشائية-كلية الهندسة المدنية-جامعة دمشق

** استاذ دكتور -قسم الهندسة الإنشائية-كلية الهندسة المدنية-جامعة دمشق.

The effect of concrete compressive strength and the amount of shear reinforcement on shear strengthening of continuous reinforced beams using CFRP sheets

*Hasan Alattar

** Abd Al Hamed Kikhea

(Received: 3 September 2018, Accepted: 9 December 2018)

Abstract:

The effect of strengthening continuous reinforced beams on shear using CFRP sheets can be associated by several factors such as the mechanical and dimensions properties for sheets, and some of them related to the beam as concrete compressive strength and amount of shear reinforcement.

Using Finite Element Method (FEM), and Materially Non-linear Analysis (MNA) is performed to a series of continuous reinforced concrete beams strengthened on shear using CFRP sheets by analytic numerical study. Also, a parametric study has been carried out to study the effect of concrete compressive strength and amount shear reinforcement on shear strengthening of those beams strengthened using CFRP sheets.

This research shows that the effect of CFRP in strengthening the continuous reinforced concrete beams on shear increases when the ability of these beams are decreased without strength, This efficiency is increased when the concrete compressive strength used is decreases and when the amount of shear reinforcement are decreases.

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) – continuous beams –Reinforced Concrete – Shear strengthening – finite element method – Non Linear Analysis.

*Master student– Structural dep., Faculty of civil Engineering, Damascus Univ.

** Dr. Abd Al Hamed Kikhea Structural dep., Faculty of civil Engineering, Damascus Univ.

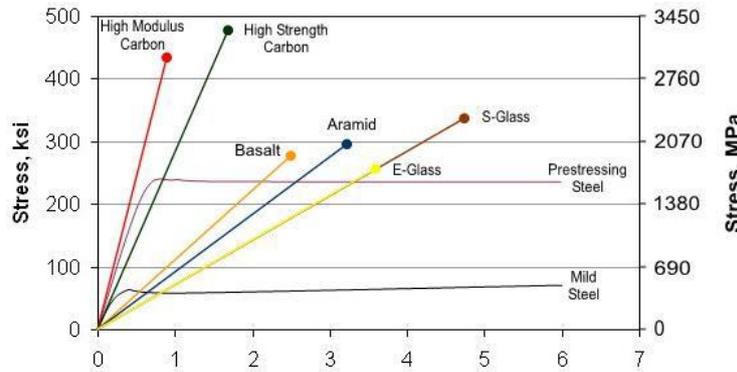
1-المقدمة

تعتبر الجوائز البيتونية المسلحة المستمرة من العناصر الإنشائية الهامة في الأبنية، والتي يمكن أن تحتاج إلى تقوية لأغراض عدة نتيجة التشققات أو الحاجة إلى زيادة الأحمال الاستثمارية. كما تعتبر تقوية العناصر الإنشائية المختلفة ومنها الجوائز باستعمال البوليمرات المسلحة بالألياف (FRP) من وسائل التقوية الحديثة والتي لاقت انتشاراً واسعاً في الآونة الأخيرة. تتألف البوليمرات المسلحة بالألياف من الألياف (Fiber) التي تؤمن المقاومة العالية، ومن مادة رابطة (Matrix) تربط الألياف مع بعضها، وتؤمن نقل الحمولة بين الألياف بالإضافة إلى حمايتها من المؤثرات البيئية. تختلف خصائص مادة الـ FRP باختلاف نوع الألياف المستخدمة، وتعد الألياف الكربونية والزجاجية والأراميدية الأكثر شيوعاً. يبين الجدول (1) بعض الخواص الميكانيكية للأنواع الشائعة من الألياف المستخدمة في عمليات تقوية المنشآت.

الجدول رقم (1): خصائص الأنواع المختلفة للألياف المستخدمة في أعمال التقوية. [8]

Fibre	اجهاد الشد الحدي (MPa)	معامل المرونة (GPa)	التشوه النسبي الحدي عند الانقطاع (%)	الكثافة (t/m ³)	معامل التمدد الحراري (10 ⁻⁶ /C)
Carbon: High strength	4300-4900	230-240	1.9-2.1	1.8	-0.38
Carbon: High modulus	2740-5490	294-329	0.7-1.9	1.78-1.81	-0.83
Carbon: Ultra high modulus	2600-4020	540-640	0.4-0.8	1.91-2.12	-1.1
Aramid: High strength and high modulus	3200-3600	124-130	2.4	1.44	2.1
Glass	2400-3500	70-85	3.5-4.7	2.6	4.9

والشكل (1) يبين مجال (الإجهاد-التشوه) للأنواع الشائعة من الـ FRP مع مقارنتها بالفولاذ. حيث يمكن ملاحظة المقاومة العالية لمادة الـ FRP والسلوك الخطي المرن حتى الانهيار مع عدم وجود حد الخضوع الذي يتميز به فولاذ التسليح.



الشكل رقم (1): مجال الإجهاد-التشوه لمختلف أنواع الـ FRP. [7]

يعتبر الإيبوكسي (Epoxy) من المواد الراتنجية (Resins) الأكثر استخداماً كمادة رابطة بين الألياف بسبب القيم العالية التي يتصف بها لإجهاد الشد والتشوه الحدي، كما يتميز بالقدرة العالية على الالتصاق ومقاومة العوامل البيئية والمؤثرات الكيميائية المختلفة. يمكن اعتبار ضعف مقاومة الحريق من مساوئ استخدام مركبات الـ FRP في عمليات التقوية، وذلك بسبب فقدان المادة الرابطة أو الحاضنة (Matrix) القدرة على التماسك عند تعرضها لدرجات حرارة معينة. يبين الجدول (2) خصائص بعض المواد الرابطة المستخدمة في مركبات الـ FRP.

الجدول رقم (2): الخصائص الميكانيكية لبعض أنواع المواد الرابطة. [3]

Resin	اجهاد الشد الحدي (MPa)	معامل المرونة (GPa)	التشوه النسبي الحدي عند الانقطاع (%)	الكثافة (t/m ³)	معامل التمدد الحراري (10 ⁻⁶ /C)
Epoxy	60-85	2.6-3.8	1.5-8	1.11-1.2	30-70
Polyester	50-75	3.1-4.6	1-2.5	1.11-1.25	30-70
Phenolic	60-80	3-4	1-1.8	1-1.25	80
Polyurethane	15-25	0.5	10	1.15-1.2	40

2-هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى دراسة أثر المقاومة المميزة للخرسانة وكمية التسليح العرضي على فعالية تقوية الجوائز الخرسانية المسلحة المستمرة على القص بشرائح CFRP.

3-الدراسة المرجعية

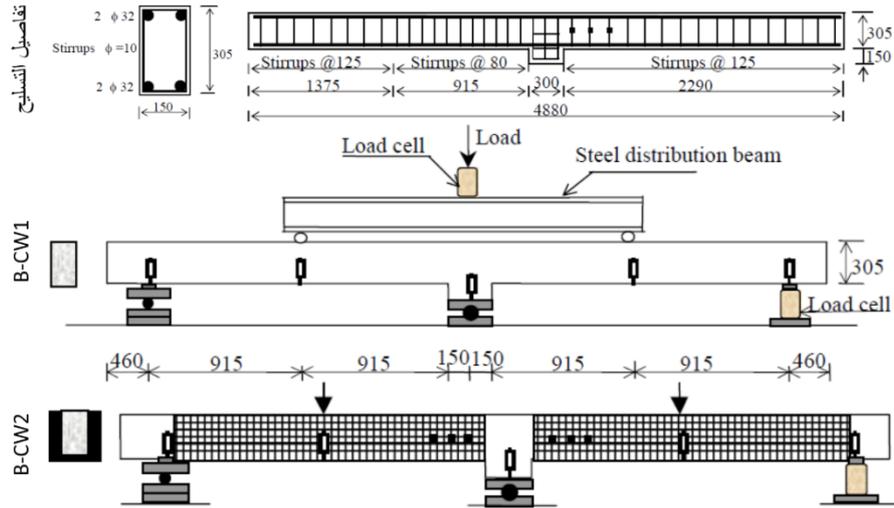
أجريت العديد من الدراسات التجريبية حول موضوع تقوية الجوائز الخرسانية المسلحة المستمرة على القص بشرائح CFRP، من هذه الدراسات دراسة لـ (Khalifa; etal. 1999) [9] شملت اختبار 9 جوائز بيتونية مسلحة ومستمرة مصنفة في ثلاث سلاسل (B-CW، B-CO ، B-CF) تختلف عن بعضها بالتسليح الطولي والعرضي والمقاومة المميزة للخرسانة المستعملة وشكل التقوية بشرائح الـ CFRP. الجدول (3) يبين خواص المواد المستعملة للنماذج المختبرة.

الجدول رقم (3): خواص المواد المستعملة للنماذج المختبرة [9]

المادة	النموذج	مقاومة الضغط المتوسطة للخرسانة (Mpa)	اجهاد الشد الحدي (Mpa)	اجهاد التشوه الحدي (Mpa)	معامل المرونة (Gpa)
الخرسانة	المجموعة B-CW	27.5	-	-	25
	المجموعة B-CO	20.5	-	-	22
	المجموعة B-CF	50	-	-	33
حديد التسليح	D=32 mm	-	460	730	200
	D=16 mm	-	430	700	200
	D=10 mm	-	350	530	200
CFRP	شرائح* Tf=0.165 mm	-	-	3500	228

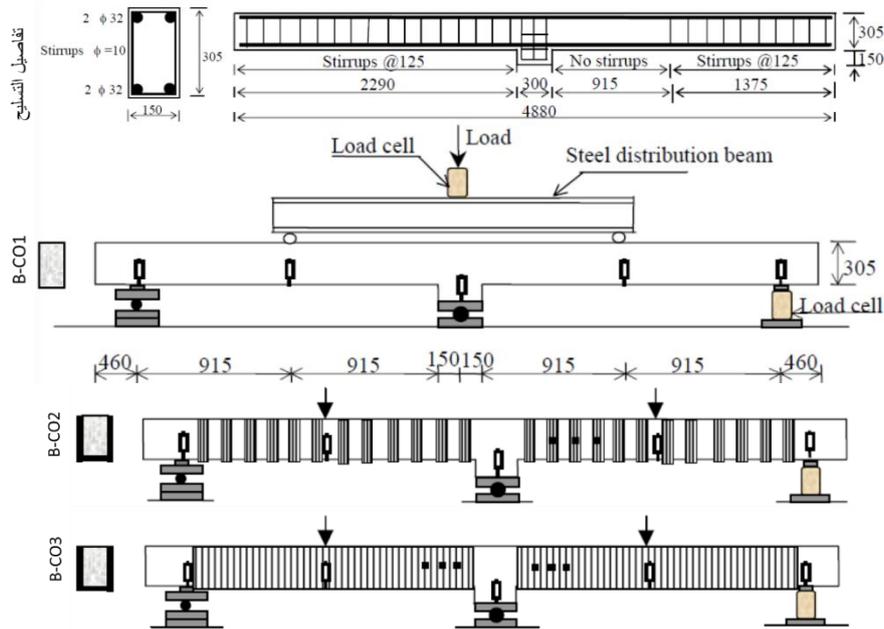
*الياف فقط

السلسلة الأولى B-CW تتألف من جائزين B-CW1 و B-CW2 كما بالشكل (2)، حيث الجائز B-CW1 مرجعي غير مقوى أما الجائز B-CW2 فتمت تقويته بطبقتين مستمرتين من شرائح الـ CFRP، الأولى عمودية على محور الجائز والثانية موازية له.



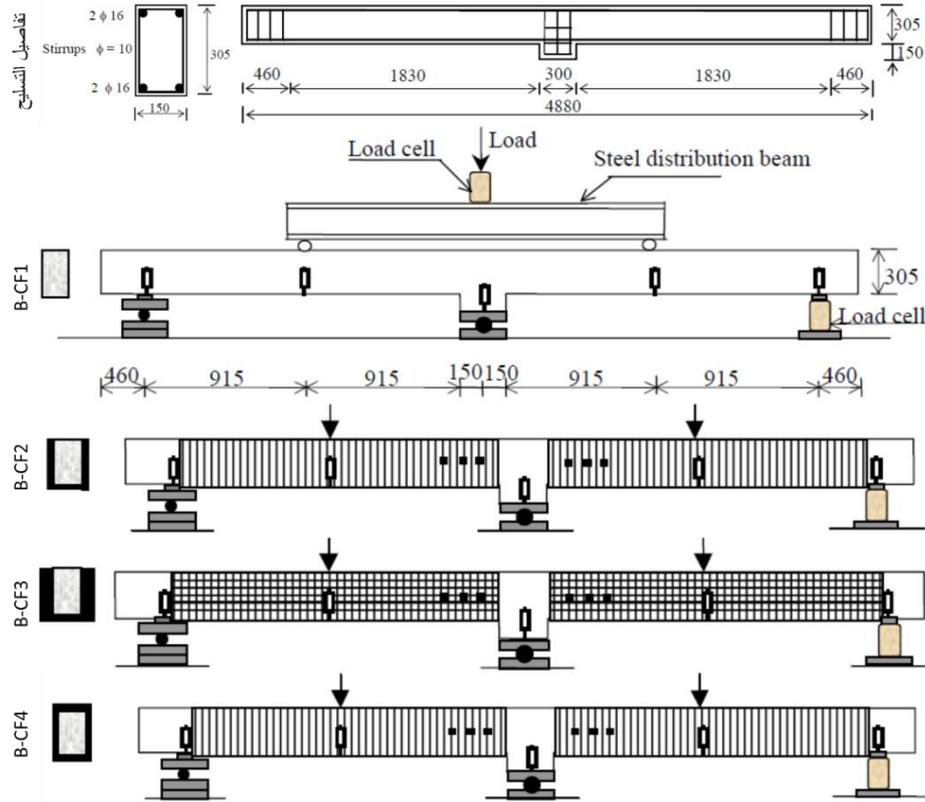
الشكل رقم (2): نماذج السلسلة B-CW وتفاصيل تسليح الجوائز. [9]

أما السلسلة الثانية B-CO والمبينة بالشكل (3)، فتتألف من أربع جوائز، جوائز مرجعي B-CO1 وجائزان مقويان، الجائز المقوى الأول B-CO2 مقوى بشرائح CFRP بعرض ($W_f = 50 \text{ mm}$) وبتباعد متساوي بين مراكز الشرائح ($S_f = 125 \text{ mm}$)، أما الجائز الثاني B-CO3 مقوى بطبقة مستمرة من CFRP تغطي مجازي الجوائز من ثلاث وجوه (U-wrap).



الشكل رقم (3): نماذج السلسلة B-CO. [9]

أما السلسلة الثالثة B-CF تتألف من أربعة جوائز، جوائز مرجعي B-CF1 وثلاث جوائز مقواه B-CF2، B-CF3 و-B-CF4، حيث كانت التقوية كبيرة في هذه السلسلة بطيات مستمرة من شرائح CFRP على كامل مجازات الجوائز، الشكل (4).



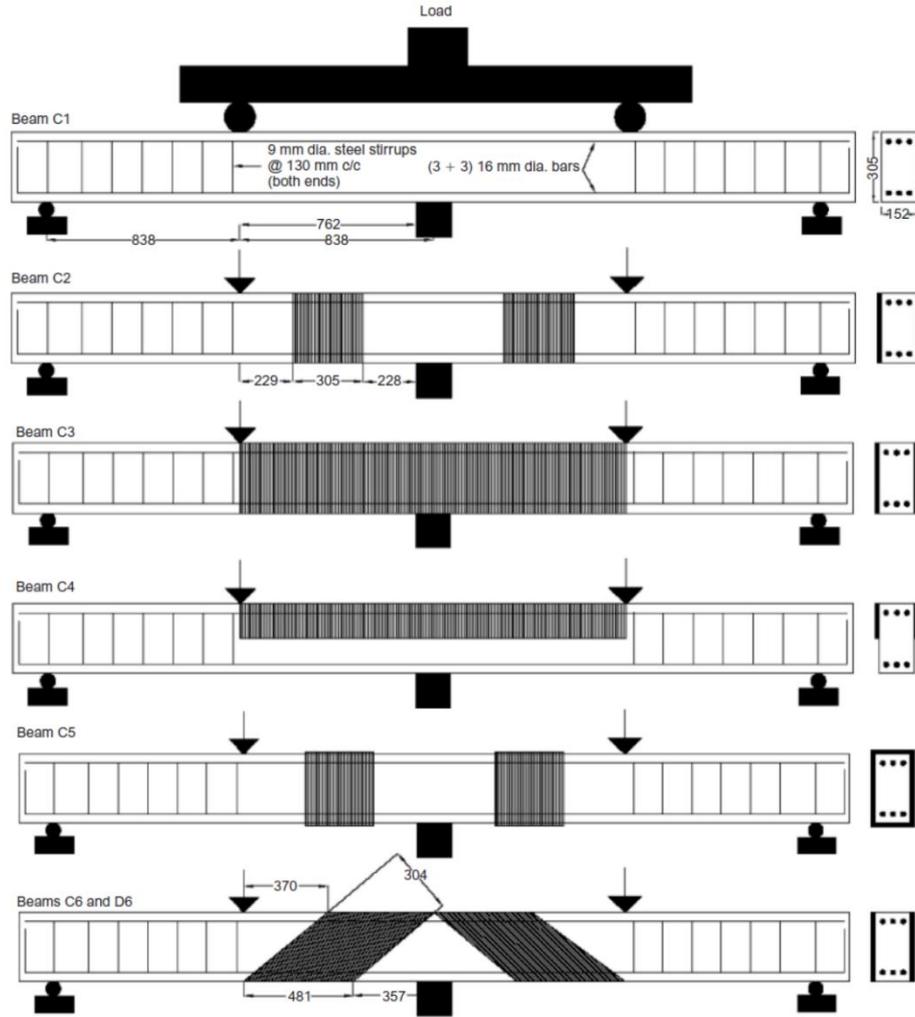
الشكل رقم (4): نماذج السلسلة B-CF. [9]

يبين الجدول (4) ملخص النتائج التجريبية للسلاسل الثلاث، حيث يلاحظ ازدياد فعالية الشرائح في رفع قدرة تحمل الجوائز للقوة القصبة مع انخفاض كمية التسليح العرضي في السلسلة الثانية B-CO، كما يلاحظ انخفاض فعالية شرائح الـ CFRP مع زيادة المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة كما في المجموعة الثالثة B-CF.

الجدول رقم (4): ملخص النتائج التجريبية للسلاسل الثلاث. [9]

النموذج	التسليح العرضي قرب المسند الوسطي	CFRP	نمط الانهيار	قوة القص الحدية (kN)	مساهمة شرائح الـ CFRP في تحمل القوة القصبة (kN)	فعالية شرائح الـ CFRP في رفع قدرة تحمل الجوائز للقوة القصبة (%)
B-CW1	φ10@125mm	-	قص	175	0	-
B-CW2	φ10@125mm	طبقتين (0°/90°)	انعطاف	214	> 39.0	> 22
B-CO1	-	-	قص	48	0	-
B-CO2	-	50 @ 125mm	انفصال الشرائح عن الجوائز	88	40	83
B-CO3	-	طبقة واحدة من ثلاث وجوه	انفصال الشرائح عن الجوائز	113	65	135
B-CF1	-	-	قص	93	0	-
B-CF2	-	طبقة واحدة من ثلاث وجوه	انعطاف	119	> 26.0	> 28
B-CF3	-	طبقتين (0°/90°)	انعطاف	131	> 38.0	> 40
B-CF4	-	طبقة واحدة من أربع وجوه	انعطاف	140	> 47.0	> 50

وفي دراسة أخرى لـ (Bukhari; etal. 2010) [6] شملت اختبار 7 جوائز، جوائز مرجعي وستة جوائز مقواة على القص بشرائح الـ CFRP وفق أشكال مختلفة كما بالشكل (5)، الجوائز جميعها لها نفس التسليح الطولي والعرضي، وستة منها (من C1 إلى C6) لها نفس المقاومة المميزة للخرسانة أما الجوائز الأخير D6 فكانت المقاومة المميزة للخرسانة فيه أقل 20% عن باقي الجوائز.



الشكل رقم (5): يبين النماذج المختبرة وأشكال التقوية المختلفة لها. [6]

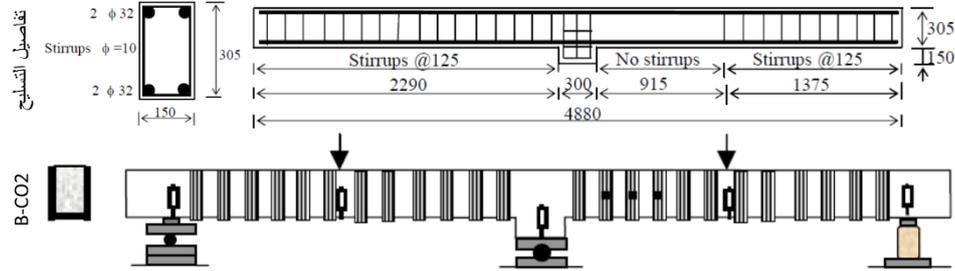
يبين الجدول (5) النتائج التجريبية للنماذج المختبرة، حيث أبدت الجوائز المقواة عموماً انتقالات أكبر وسط المجاز (سهوياً) عن الجائر المرجعي غير المقوى C1 عند الانهيار، كما يلاحظ ازدياد فعالية شرائح الـ CFRP في رفع قدرة الجائر D6 لتحمل القوة القاصة، حيث المقاومة المميزة للخرسانة فيه أقل 20% عن باقي الجوائز.

الجدول رقم (5): ملخص النتائج التجريبية للنماذج المختبرة. [6]

نمط الانهيار	السهم (mm)	فعالية شرائح الـ CFRP في زيادة قدرة تحمل الجائر للقوة القاصة (%)	قوة القص الحدية (KN)	القوة الكلية المطبقة (KN)	المقاومة المميزة للخرسانة (Mpa)	الجائر
القص	19	-	75	250		C1
انفصال الشرائح عن الجائر	2.68	53.87	115.4	384.7		C2
انفصال الشرائح عن الجائر	4.2	69.33	127	423.2		C3
تمزق الشرائح	3.9	53.87	115.4	384.7	60	C4
انفصال الشرائح عن الجائر	4.4	80.8	135.6	452		C5
انفصال الشرائح عن الجائر	5.3	92.4	144.3	480.9		C6
انفصال الشرائح عن الجائر	5	84.67	138.5	461.7	44	D6

4- بناء النموذج العددي للجوائز باستخدام برنامج الـ (ABAQUS - Ver 6.12.1)

تم بناء النموذج العددي للجائز B-CO2 المبين بالشكل (6)، والمذكور في الدراسة التجريبية لـ (Khalifa; 1999) [9]، والمقوى على القص بشرائح CFRP بعرض $W_f = 50\text{mm}$ وبتباعد متساوي $S_f = 125\text{mm}$ وتحيط بالمقطع العرضي للجائز من ثلاث جهات (U-wrap).



الشكل رقم (6): الجائز B-CO2 وتفصيل تسليحه. [9]

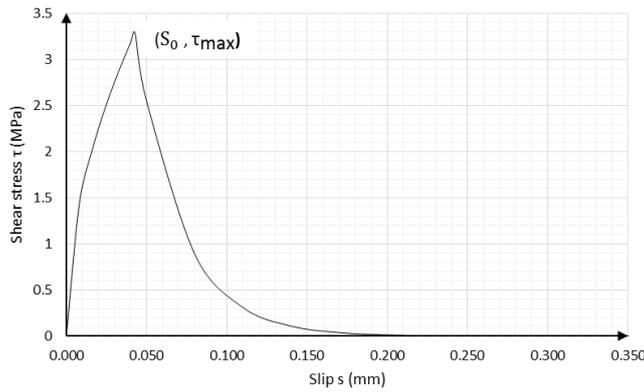
4-1- توصيف العناصر المستخدمة في البرنامج

نمذجة شرائح الـ CFRP	نمذجة حديد التسليح الطولي والعرضي	نمذجة مادة البيتون
الشكل (9): العنصر S4R [1].	الشكل (8): تمثيل العنصر الفراغي T3D2 [1].	الشكل (7): العنصر الفراغي C3D8 [1].
عنصر مساحي قشري (Shell Element) مؤلف من أربع عقد (Nodes) وكل عقدة تحتوي ست درجات حرية (3 انتقالات و3 دورانات).	عنصر شبكي فراغي (Truss Element) مؤلف من عقدتين وكل عقدة تحوي ثلاث درجات من الحرية (ثلاثة انتقالات بالاتجاهات الثلاث).	عنصر فراغي مؤلف من ثماني عقد وكل عقدة تحوي ثلاث درجات حرية (ثلاثة انتقالات بالاتجاهات الثلاث)، وهو عنصر من نوع (Solid Section).

ولربط عقد شرائح CFRP والعقد السطحية للجائز، فقد تم استخدام العنصر CONN3D2 وهو عنصر يتيح الربط بين عقدتين وفق ست درجات للحرية (ثلاثة انتقالات وثلاثة دورانات)، وذلك وفق العلاقات (1) و (2) (Lu; etal. 2005):

$$\tau = \tau_{\max} \sqrt{\frac{s}{s_0}} \quad s \leq s_0 \quad (1) \text{ العلاقة}$$

$$\tau = \tau_{\max} e^{-\alpha\left(\frac{s}{s_0}-1\right)} \quad s > s_0 \quad \text{العلاقة (2)}$$

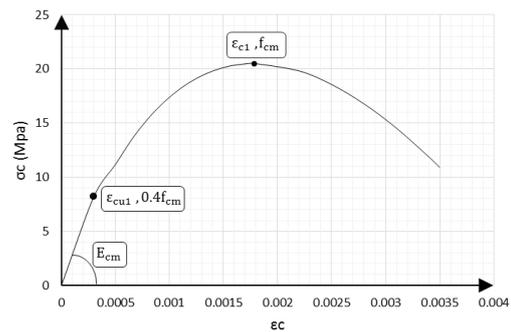
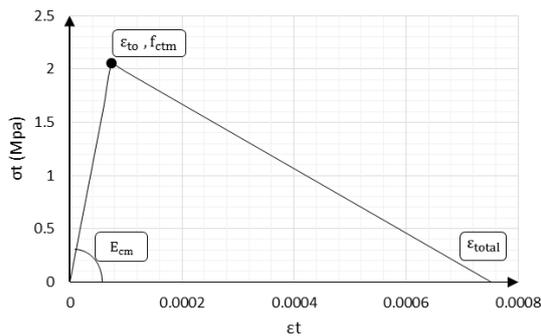


الشكل رقم (10): منحنى علاقة (الانزلاق - إجهاد التماسك) بين شرائح الـ CFRP والعقد السطحية للجوائز B-CO2 [10]. حيث τ : قيمة إجهاد التماسك عند النقطة المدروسة، τ_{\max} : قيمة إجهاد التماسك الأعظمي، s : قيمة انزلاق الشرائح عن الجوائز عند النقطة المدروسة، s_0 : قيمة الانزلاق عند وصول الإجهاد إلى القيمة الأعظمية، α : معامل تؤخذ قيمته 1.5 بحال كانت شرائح التقوية تحيط بالجوائز من ثلاث جوانب.

4-2- توصيف سلوك المواد في البرنامج

تم استخدام طريقة (Concrete Damage Plasticity-CDP) لتوصيف سلوك البيتون في حالتي الضغط والشد، حيث تأخذ هذه الطريقة بعين الاعتبار أثر التحميل الدوري (Cyclic loading) وتناقص مرونة المادة بسبب التشوهات اللدنة التي تحدث في المادة، كما تلاحظ هذه الطريقة أثر استرداد القساوة للمادة الهشة أو فيما يعرف بظاهرة اتساع وانغلاق الشق عند عملية الانتقال من الضغط إلى الشد أو من الشد إلى الضغط على التوالي عند أخذ حمولات دورية.

في حالة الضغط المحوري للببتون تم اعتماد مخطط (الإجهاد-التشوه النسبي) وفق الكود الأوروبي (Eurocode2, 2004) [5] وباستخدام معادلات (Jankowiak et al, 2005) [8]، كما هو موضح في الشكل (11)، ولنمذجة سلوك الببتون على الشد، فقد تم اعتماد مخطط (إجهاد-تشوه نسبي) مبسط كما هو موضح في الشكل (12)، حيث تم اعتبار إجهاد الشد للببتون يعادل تقريباً عشر مقاومة الببتون على الضغط $f_{ctm} = f_{cm}/10$ [5].



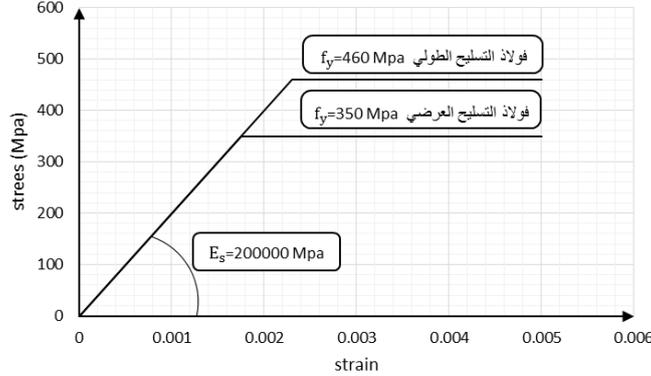
الشكل رقم (12): مخطط الإجهاد-التشوه النسبي للببتون على الشد [5].

الشكل رقم (11): مخطط الإجهاد-التشوه النسبي للببتون على الضغط $(f_{cm} = 20.5 \text{ Mpa})$ [5].

حيث:

ϵ_{cu1} : التشوه النسبي المقابل لمقاومة الضغط المتوسطة للبيتون ، ϵ_{cu1} : التشوه النسبي المقابل لمقاومة ضغط في البيتون $0.4 f_{cm}$.

ولتوصيف سلوك فولاذ التسليح تم افتراض منحنى (تشوه نسبي- إجهاد) مرن-لدن لدونة تامة لجميع أنواع الفولاذ، كما بالشكل (13).



الشكل رقم (13): مخطط (الإجهاد - التشوه النسبي) للتسليح الطولي. [5]

أما شرائح التقوية CFRP فقد تم إدخال الخصائص الميكانيكية لها كما بالدراسة المرجعية (Khalifa; 1999)، والمبينة بالجدول (6).

الجدول رقم (6): الخصائص الميكانيكية لشرائح (CFRP) المستخدمة بالتقوية. [9]

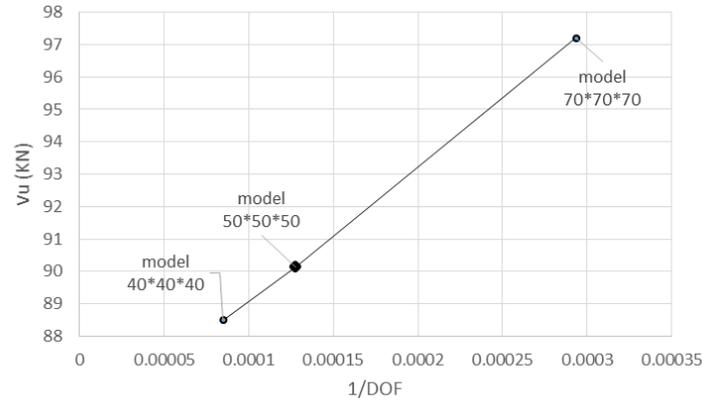
الخواص الميكانيكية للبوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية (CFRP) المستخدمة في التقوية			
$E_x=230000$	معامل المرونة باتجاه الألياف	معامل المرونة (Mpa)	
$E_y=17807$	معامل المرونة بالاتجاه العمودي على الألياف		
$E_z=17807$			
$\nu_{xy} = 0.2$	نسبة بواسون	$G_{xy} = 12052$	معامل القص (Mpa)
$\nu_{xz} = 0.2$		$G_{xz} = 12052$	
$\nu_{yz} = 0.3$		$G_{yz} = 6850$	
50 @ 125	عرض الشريحة والتباعد بين الشرائح (mm)	0.165	سمائة الشريحة (mm)

4-3- الشروط المحيطة للنموذج المدروس

تم اعتماد شروط الاستناد في النموذج المدروس كما اعتمدت في التجربة (Khalifa, 1999)، حيث المساند الطرفية بسيطة الاستناد ومتدرجة والمسند الوسطي مسند بسيط وثابت، وبما أنّ الجائز متناظر بالنسبة للمستوي (XY) تمت نمذجة نصف الجائز وذلك للاستفادة من شروط التناظر التي يتيحها برنامج ABAQUS مما يسهل ويختصر الوقت اللازم للتحليل. تم افتراض التماسك تام بين البيتون المسلح والفولاذ (Embedded Region). تم تطبيق حمولة دورية مركزة وسط كل مجاز، حيث تم تطبيق دورة واحدة للقوة حتى بداية ظهور شق القص الرئيسي، ثم اتبعت بثلاث دورات حتى الانهيار النهائي للجائز كما بالتجربة.

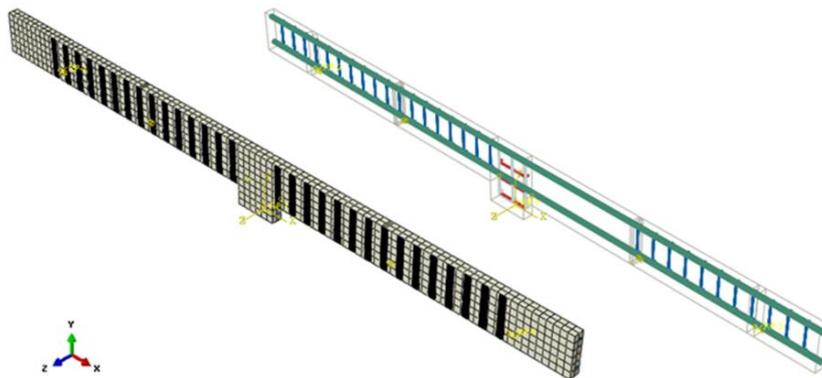
4-4-دراسة أثر تقارب الشبكة (Mesh Convergence)

إن زيادة عدد التقسيمات وفق طريقة العناصر المحدودة (Finite Element) التي يعتمدها برنامج (ABAQUS 6.12) تؤدي إلى دقة أكبر بالنتائج، لكن ذلك يتطلب زيادة في الوقت اللازم للتحليل. من أجل الوصول إلى تقسيم مثالي للشبكة يحقق الاقتصادية في زمن التحليل، وبنفس الوقت الدقة في النتائج تمت دراسة أثر تقارب الشبكة (Mesh Convergence) لنموذج الجائز المدروس، حيث تمت نمذجة الجائز B-CO2 وفق ثلاثة تقسيمات لخطوط الشبكة (40*40*40 mm) و (50*50*50 mm) و (70*70*70 mm). يبين الشكل (14) والذي يمثل المحور الأفقي فيه مقلوب عدد درجات الحرية (Degree of Freedom) في النموذج، بينما يمثل المحور الشاقولي قوة القص القصوى (v_u) التي يتحملها الجائز، وذلك من أجل تقسيمات الشبكة المذكورة سابقاً. يُلاحظ من الشكل حدوث تقارب بالنتائج عند استخدام العنصر الفراغي C3D8 المستخدم لنمذجة مادة البيتون بأبعاد (40*40*40 mm) حيث $v_u = 88.6$ KN وعند استخدام نفس العنصر بأبعاد (50*50*50 mm) حيث $v_u = 90.15$ KN، بينما أدى استخدام نفس العنصر بأبعاد (70*70*70 mm) إلى قوة قص قصوى $v_u = 97.2$ KN، وبالتالي فإن اعتماد العنصر الفراغي C3D8 بأبعاد (50*50*50 mm) كافٍ للحصول على حل دقيق مع اقتصادية في زمن التحليل.



الشكل (14): دراسة أثر تقارب الشبكة للنموذج المدروس (B-CO2). (ABAQUS 6.12).

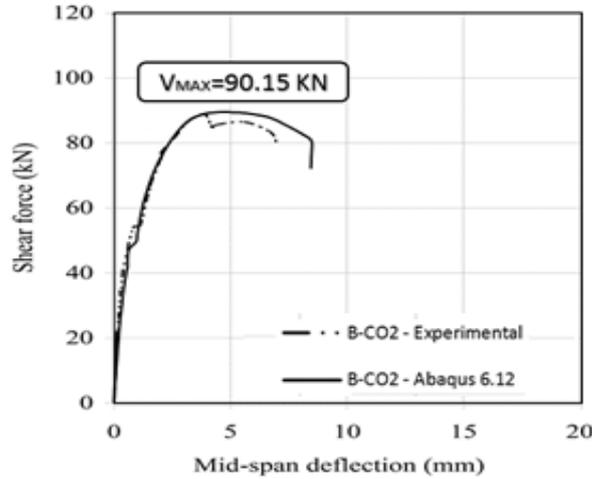
والشكل (15) يبين الشكل النهائي للجائز المدروس في البرنامج وفق (50*50*50 mm) وتفاصيل تسليحه.



الشكل رقم (15): النموذج النهائي للجائز B-CO2 [1].

4-4- التحقق من النموذج ومقارنة النتائج التحليلية:

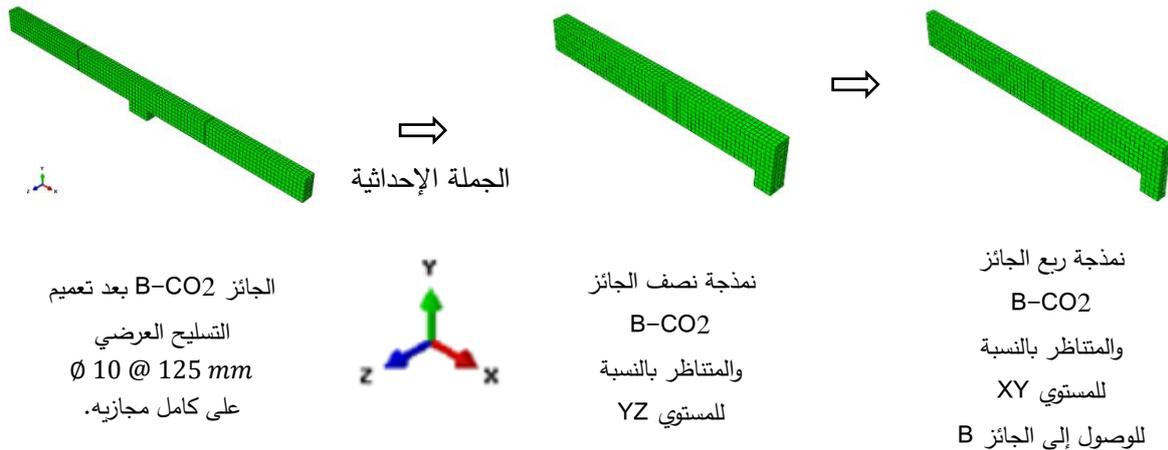
يتم التحقق من صحة النمذجة للجائز B-CO2 بمقارنة مغلقات (السهم-قوة القص) لدورات تحميل الجائز الناتجة من الدراسة العددية والدراسة التجريبية لـ (Khalifa; 1999) كما هو موضح بالشكل (16)، حيث يُلاحظ تقارب المنحنيين من بعضهما على كامل طوليهما، مع قوة قص حدية متساوية بين النموذج العددي والمخبري.



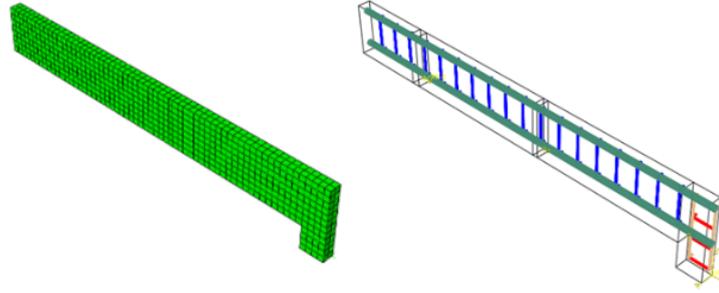
الشكل رقم (16): مقارنة منحنى (السهم - قوة القص) للجائز B-CO2، للدراسة المرجعية والنموذج التحليلي.

5- الدراسة البارامترية

إن الحالة الواقعية تفرض وجود حديد التسليح العرضي لمجازات القص بالجوائز، وبعد التأكد من صحة النمذجة من حيث العناصر المستخدمة في بناء النموذج العددي و توصيف سلوك المواد المختلفة والشروط المحيطة للنموذج تم بناء النموذج B الناتج من الجائز B-CO2 بعد تعميم التسليح العرضي $\emptyset 10 @ 125 \text{ mm}$ على كامل مجازي الجائز B-CO2 من أجل الدراسة البارامترية، ولكون الجائز B أصبح متناظر بالنسبة للمستويين (XY) و (YZ)، ولتسهيل واختصار وقت التحليل فإنه بالإمكان نمذجة ربع الجائز فقط كما بالشكل (17).



الشكل رقم (17): الاستفادة من شروط التناظر لنمذجة الجائز B (ربع الجائز B-CO2 بعد تعميم التسليح العرضي على كامل مجازيه). [1].



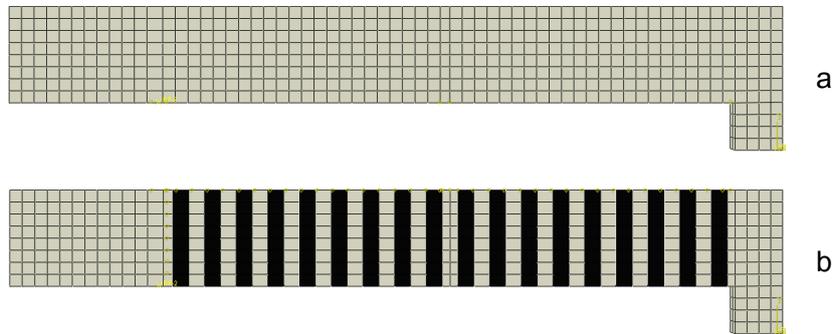
الشكل رقم (18): النموذج النهائي للجائز B وتفاصيل تسليحه. [1]

5-1- أثر تغيير المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة

لدراسة أثر تغيير المقاومة المميزة للخرسانة على فعالية تقوية الجوائز البيتونية المسلحة والمستمرة على القص بشرائح الـ CFRP، تم بناء خمس مجموعات من النماذج انطلاقاً من الجائز B الشكل (19)، تختلف كل مجموعة عن الأخرى بالمقاومة المميزة للخرسانة المستعملة فيها، حيث تحتوي كل مجموعة جائزين، الجائز الأول مرجعي غير مقوى، والجائز الثاني مقوى بشرائح الـ CFRP ذات التباعد $(S_f = 100 \text{ mm})$ والسماكة $(T_f = 0.66 \text{ mm})$ ، مع اعتبارات التصميم المذكورة سابقاً، والجدول (7) والشكل (17) يبينان المجموعات الخمس وخصائص تقوية الجوائز.

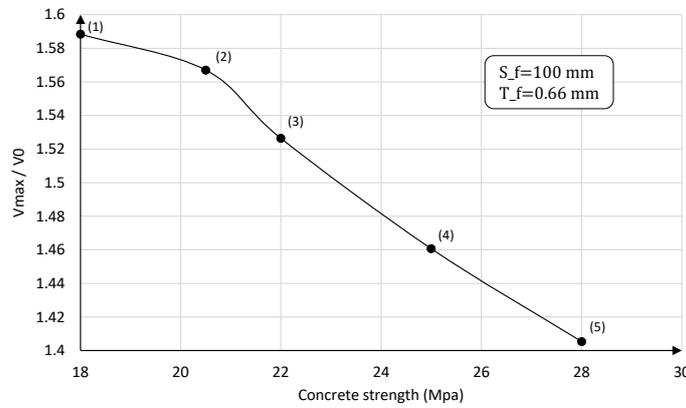
الجدول رقم (7): خصائص المجموعات الخمس.

المجموعة	الجائز	شرائح CFRP $W_f @ S_f$ (mm)	سماكة شرائح CFRP T_f (mm)	المقاومة المميزة للخرسانة (Mpa)	حديد التسليح العرضي (الأساور) (mm)
الأولى	B-18	-	-	18	Stirrups @ 125
	B-18-S	50 @ 100	0.66		
الثانية	B-20.5	-	-	20.5	
	B-20.5-S	50 @ 100	0.66		
الثالثة	B-22	-	-	22	
	B-22-S	50 @ 100	0.66		
الرابعة	B-25	-	-	25	
	B-25-S	50 @ 100	0.66		
الخامسة	B-28	-	-	28	
	B-28-S	50 @ 100	0.66		

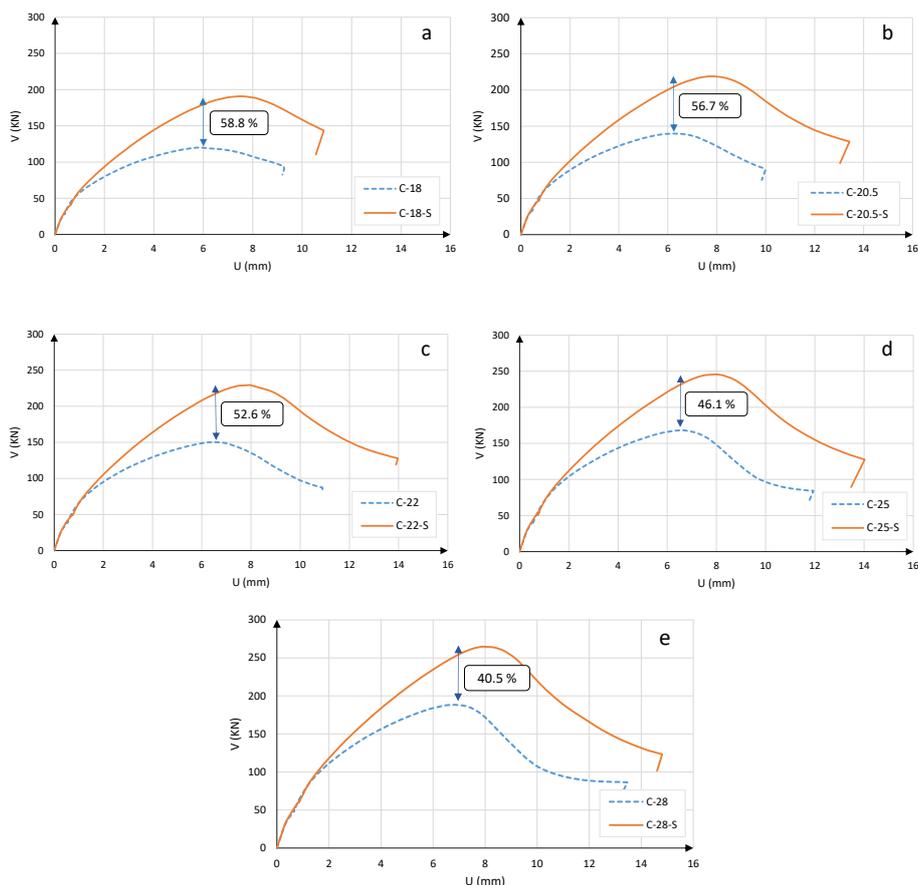


الشكل رقم (19): a النموذج المرجعي (غير المقوى) و b النموذج المقوى بشرائح الـ CFRP للمجموعات الخمس.

وبإجراء التحليل اللاخطي للجوائز في المجموعات الخمس باستخدام برنامج ABAQUS ، تم الحصول على قوة القص الحدية العظمى التي تتحملها الجوائز في المجموعات الخمس من معادلة توازن القوى بين القوة المطبقة و ردود الأفعال عند المساند. يبين الشكل (20) علاقة تغيير قوة القص الحدية العظمى للجوائز البيتونية المسلحة والمستمرة المقواة بشرائح الـ CFRP ذات التباعد ($S_f = 100 \text{ mm}$) والسماكة ($T_f = 0.66 \text{ mm}$)، منسوبة إلى قوة القص الحدية العظمى لنفس الجوائز بدون تقوية لكل مجموعة من المجموعات الخمس مع تغيير المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة. يوضح الشكل أن فعالية شرائح الـ CFRP في رفع قدرة الجوائز البيتونية المسلحة والمستمرة للقوة القاصة تتخفف مع ازدياد المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة، حيث كانت أعلى فعالية لهذه التقوية عند استعمال خرسانة مقاومتها المميزة ($f_c^{\lambda} = 18 \text{ Mpa}$) وذلك بالمجموعة الأولى والموافقة للنقطة (1) على المخطط، لتتخفف بعدها فعالية شرائح الـ CFRP في رفع قدرة الجوائز المدروسة للقوة القاصة مع ازدياد المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة، ويكون هذا الانخفاض في البداية قليلاً حتى النقطة (3) والموافقة ($f_c^{\lambda} = 22 \text{ Mpa}$) في المجموعة الثالثة، ليصبح بعدها الانخفاض أكبر في المجموعة الرابعة والخامسة حيث ($f_c^{\lambda} = 25 \text{ Mpa}$) و ($f_c^{\lambda} = 28 \text{ Mpa}$) على التوالي، والموافقة للنقاط (4) و (5) على التوالي.

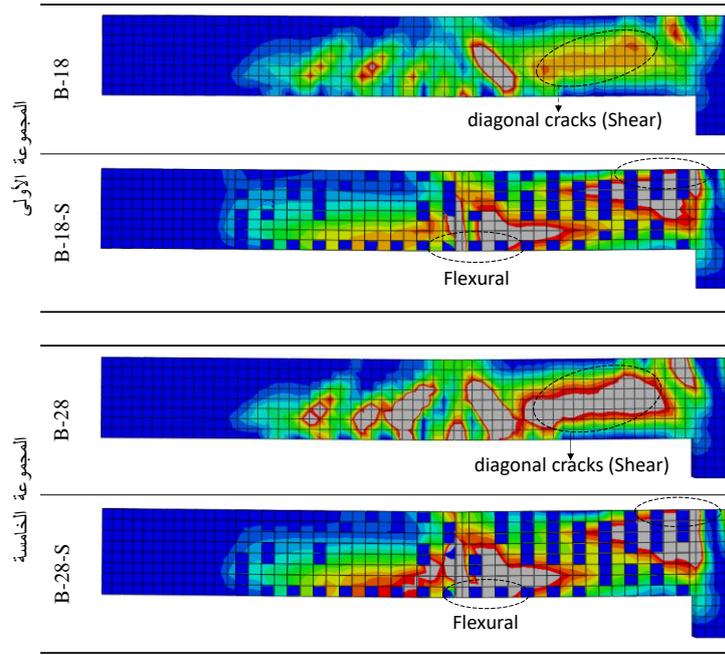


الشكل رقم (20): علاقة تغيير قوة القص الحدية للجوائز المقواة مع تغير المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة. يبين الشكل (21) مغلف منحنيات الانتقال وسط المجاز (السهم) - قوة القص لدورات التحميل لكل مجموعة من المجموعات الخمس، حيث يظهر الشكل انخفاض فعالية تقوية الجوائز بشرائح الـ CFRP على القص مع زيادة المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة، حيث كانت فعالية التقوية بالمجموعة الأولى حيث ($f_c^{\lambda} = 18 \text{ Mpa}$) حوالي % 58.8، لتتخفف هذه الفعالية حتى % 40.5 في المجموعة الخامسة حيث ($f_c^{\lambda} = 28 \text{ Mpa}$). نتائج مشابهة أوردها (Khalifa; 1999) [9]، حيث أدت زيادة المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة انخفاض فعالية شرائح الـ CFRP بنسب مختلفة كان أكبرها في الجوائز غير المسلحة بتسليح عرضي، مما يعكس أثر المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة والتسليح العرضي على فعالية شرائح التقوية.



الشكل رقم(21): a , b , c , d , e مغلف منحنيات الانتقال وسط المجاز (السهام) – قوة القص لجوائز المجموعات 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 على التوالي.

إن نوع التحليل المستخدم لتحليل النماذج المدروسة يقوم على دراسة الجوائز تحت تأثير القوى المطبقة المتزايدة لمرحلة بعد الانهيار، ولكن ما يهم هو سوية الحمل التي تخرج بها الخرسانة عن العمل عند تشوه نسبي للخرسانة على الضغط 0.35% . يبين الشكل (22) التشوهات النسبية الرئيسية للجوائز المدروسة في المجموعتين الأولى والخامسة، حيث يبين الشكل انحصار التشققات القطرية (شقوق القص) في الجوائز المقواة وميلها لتبدي تشققات عمودية على محور الجوائز (شقوق الانعطاف) في مناطق الشد عند المسند الوسطي حيث العزم السالب ووسط المجاز حيث العزم موجب.



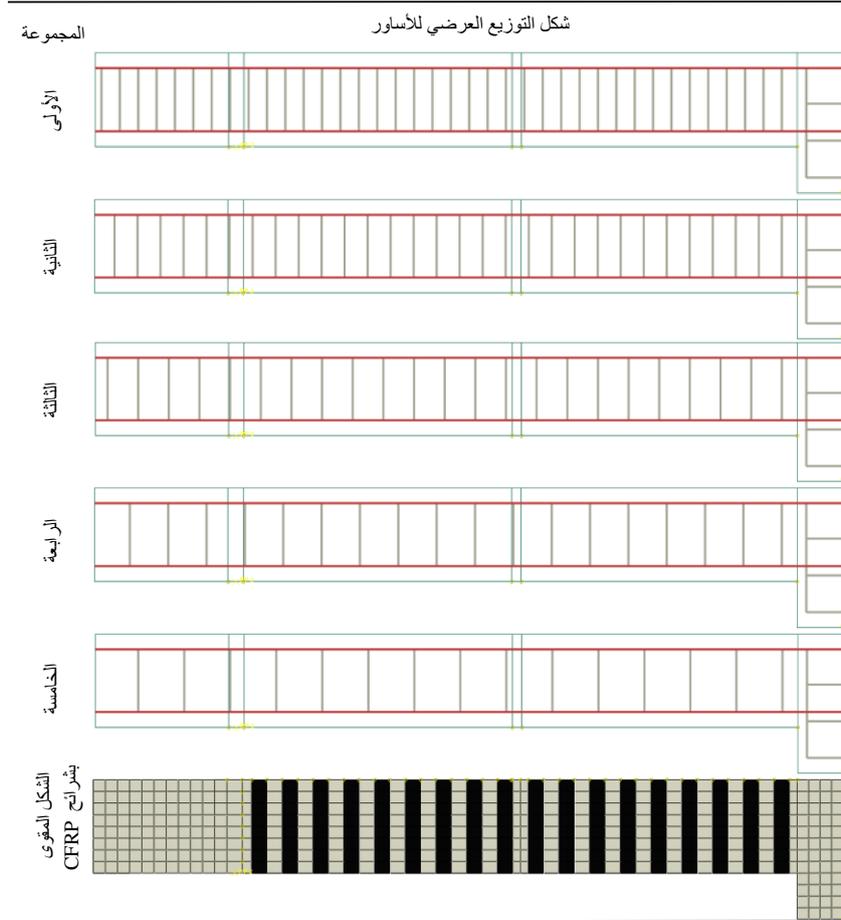
الشكل رقم (22): اتجاه التشوهات النسبية الرئيسية الناشئة في جوائز المجموعتين الأولى والخامسة عند وصولها إلى قدرة تحملها القصوى على القص. [1]

5-2- أثر كمية التسليح العرضي (الأساور) على فعالية تقوية الجوائز الخرسانية المسلحة المستمرة على القص بشرائح الـ CFRP:

تمت الدراسة التحليلية لخمسة مجموعات من النماذج تختلف عن بعضها بكمية التسليح العرضي فقط، حيث تحتوي كل مجموعة جائزين الأول مرجعي دون تقوية والأخر مقوى بشرائح الـ CFRP ذات التباعد ($S_f = 100 \text{ mm}$) والسماكة ($T_f = 0.66 \text{ mm}$) و ($f_c^{\lambda} = 20.5 \text{ Mpa}$)، كما بالجدول (8) والشكل (23).

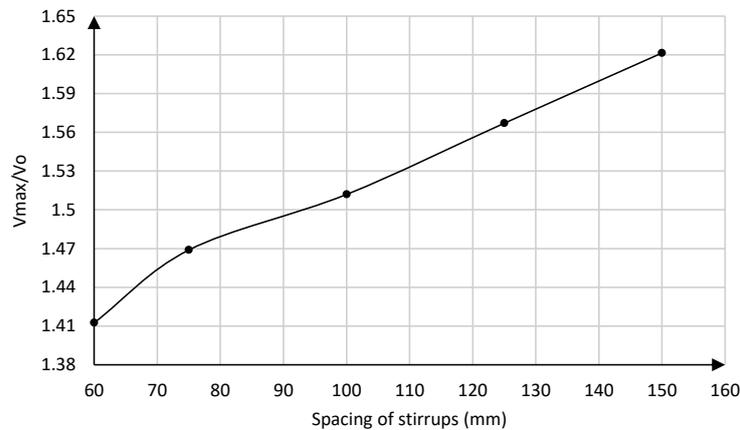
الجدول رقم (8): التباعد بين الأساور وشرائح الـ CFRP لجوائز المجموعات الخمس.

المجموعة	الجائز	حديد التسليح العرضي (الأساور) (mm)	شرائح الـ CFRP $W_f @ S_f$ (mm)	T_f (mm)
الأولى	B-60	Stirrups @ 60	-	-
	B-60-S	Stirrups @ 60	50 @ 100	0.66
الثانية	B-75	Stirrups @ 75	-	-
	B-75-S	Stirrups @ 75	50 @ 100	0.66
الثالثة	B-100	Stirrups @ 100	-	-
	B-100-S	Stirrups @ 100	50 @ 100	0.66
الرابعة	B-125	Stirrups @ 125	-	-
	B-125-S	Stirrups @ 125	50 @ 100	0.66
الخامسة	B-150	Stirrups @ 150	-	-
	B-150-S	Stirrups @ 150	50 @ 100	0.66



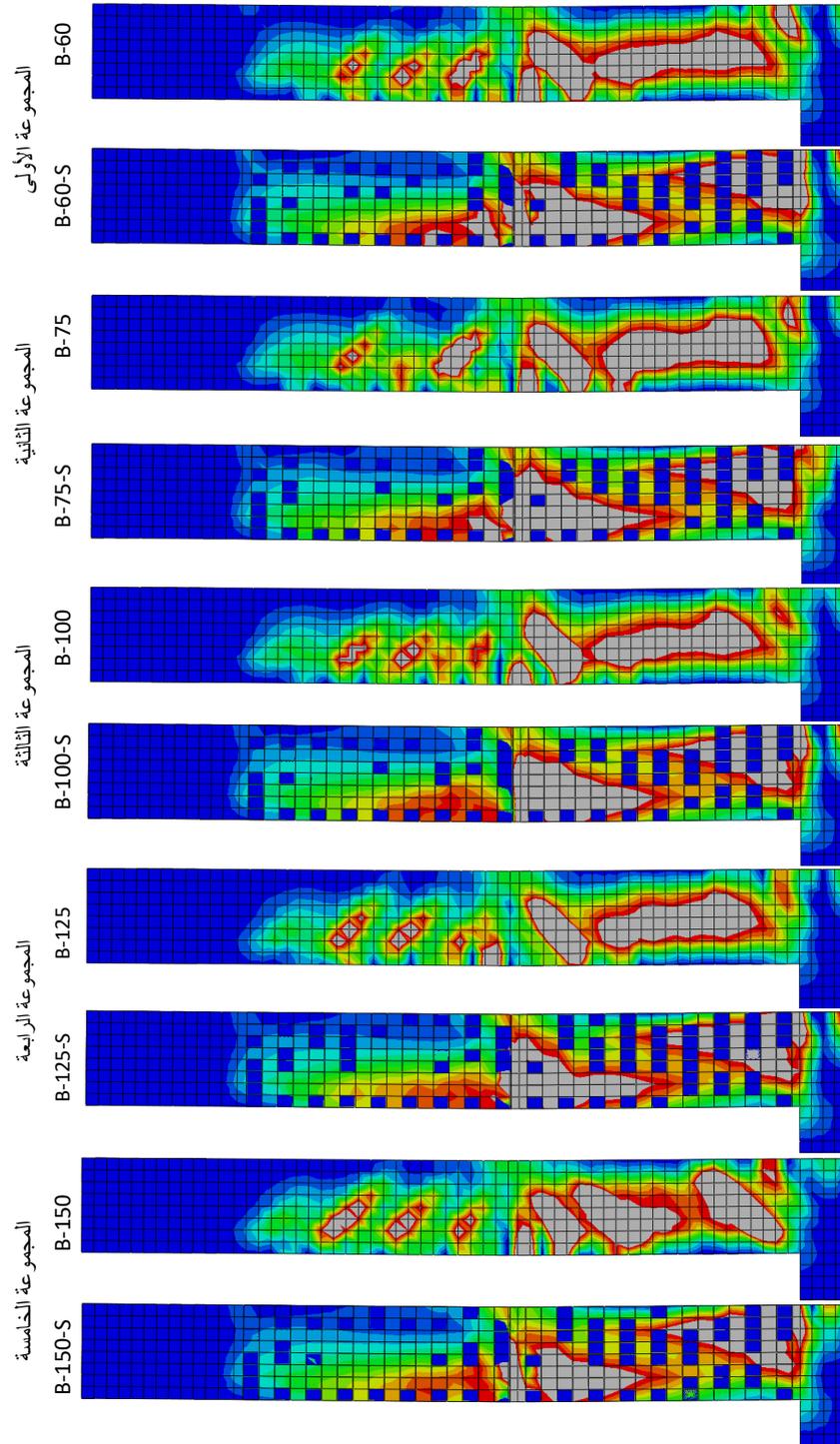
الشكل رقم (23): شكل التوزيع العرضي للأساور وشرائح الـ CFRP لجوائز المجموعات الخمس.

يبين الشكل (24) علاقة تغير قوة القص الحديدية العظمى (V_{max}) للجوائز المقوى منسوبة إلى قوة القص الحديدية العظمى لنفس الجوائز دون تقوية (V_0) مع تغير التباعد بين أساور التسليح العرضي للمجموعات الخمس، حيث يبين الشكل ازدياد فعالية شرائح الـ CFRP في رفع قدرة الجوائز لتحمل القوة القصية مع ازدياد المسافة بين أساور التسليح العرضي، حيث تكون هذه العلاقة شبه خطية.



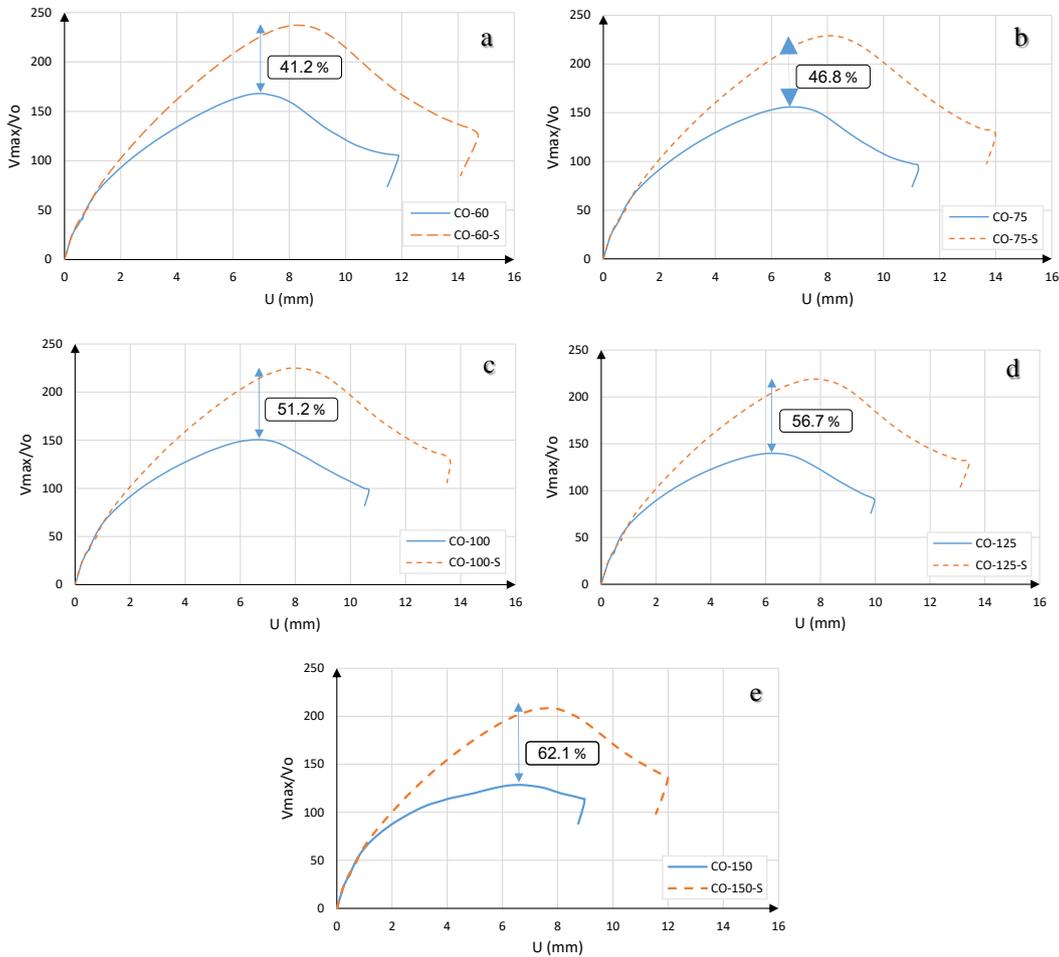
الشكل رقم (24): علاقة تغير قوة القص الحديدية للجوائز مع تغير كمية التسليح العرضي (الأساور) للجوائز المدروسة.

يبين الشكل (25) النتائج التحليلية لنماذج المجموعات الخمس المدروسة، واتجاه التشوهات الرئيسية الناشئة في الجوائز عند الانهيار، حيث يبين الشكل أن الجوائز المرجعية (غير المقواة) في كل المجموعات أبدت شقوق قص واضحة، في حين أن الجوائز المقواة كان الانهيار فيها بخروج الخرسانة عن العمل في منطقتي الشد وسط المجاز حيث العزم الموجب وعند المسند الوسطي حيث العزم السالب.



الشكل رقم(25): اتجاه التشوهات الرئيسية الناشئة في لجوائز المجموعات الخمس عند وصول هذه الجوائز إلى قدرة تحملها القصوى على القص. [1]

تُقاوم الاجهادات القاصة في الجوائز الخرسانية المسلحة المقواة على القص بشرائح الCFRP عبر فعل الوند لتسليح الشد وتشابك الحصويات والقص المحمول في منطقة الضغط والقص الذي يتحملة التسليح العرضي عبر الشد بعد تشكل الشقوق القطرية إضافة لمساهمة شرائح الCFRP، حيث تسهم هذه المركبات مجتمعة بمقاومة القوة القاصة بنسب مختلفة، وبالتالي فإن أي انخفاض في إحدى هذه المركبات يقابله زيادة في باقي المركبات بنسب مختلفة، فانخفاض كثافة التسليح العرضي وثبات باقي المركبات أصبحت مساهمة التسليح العرضي في مقاومة القوة القاصة أصغر، وهذا ما تبينه النتائج التحليلية للنماذج المدروسة (الشكل 26)، حيث ازدادت فعالية شرائح الCFRP في رفع قدرة الجوائز لتحمل القوة القاصة مع زيادة المسافة بين أساور التسليح العرضي، ففي المجموعة الأولى حيث التسليح العرضي (Stirrups @ 60) ازدادت قدرة الجوائز B-60-S للقوة القاصة بمقدار 41.2%، لتزداد هذه الفعالية في المجموعات التالية مع ازدياد المسافة بين أساور التسليح العرضي وذلك بشكل خطي تقريباً مع استخدام التقوية نفسها من حيث التباعد وسماكة شرائح الCFRP، حيث وصلت فعالية شرائح الCFRP في المجموعة الخامسة حيث التسليح العرضي حيث (Stirrups @ 150) إلى 62.1%. أورد (Khalifa;) (1999) [9] نتائج مشابهة، حيث أدى تسليح بعض الجوائز بتسليح عرضي $\emptyset 10 @ 125 \text{ mm}$ إلى انخفاض فعالية شرائح التقوية بنسبة وصلت حتى 20% عن جوائز غير مسلحة بتسليح عرضي.



الشكل رقم (26): a , b , c , d , e مغلف منحنيات الانتقال وسط المجاز (السهم) - قوة القص لدورات تحميل الجوائز في المجموعات 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 على التوالي.

6-النتائج:

6-1: إن فعالية شرائح الCFRP في تقوية الجوائز البيتونية المسلحة المستمرة على القص أكبر عند انخفاض قدرة تحمل هذه الجوائز للقوة القاصة بدون تقوية.

6-2: إن فعالية استخدام شرائح الCFRP في تقوية الجوائز البيتونية المسلحة المستمرة على القص أكبر عند انخفاض المقاومة المميزة للخرسانة المستعملة، حيث كانت فعالية الشرائح 58.8% عند $(f_c^{\lambda} = 18 \text{ Mpa})$ لتتخفص حتى 40.5 % عند $(f_c^{\lambda} = 28 \text{ Mpa})$ لحالة الجائز المدروس ووفق طريقة تقويته.

6-3: إن فعالية تقوية الجوائز البيتونية المسلحة المستمرة على القص باستخدام شرائح الCFRP أكبر مع انخفاض كمية التسليح العرضي، حيث أن العلاقة بين نسبة قوة القص الحدية للجائز المقوى (V_{CFRP}) إلى قوة القص الحدية للجائز نفسه دون تقوية (V_0) مع كمية التسليح العرضي شبه خطية.

6-4: أبدت الجوائز المقوّاة على القص بـCFRP سهوياً أكبر من الجوائز المرجعية غير المقوّاة عند الانهيار، مما حسن السلوك المرن لهذه الجوائز عند الانهيار.

7-المراجع:

- 1- ABAQUS, Version 6.12, (2012), "ABAQUS/Standard User's Manual "ABAQUS Inc., USA.
- 2- Bagherpour, S. (2012). "Fibre Reinforced Polyester Composites", In Saleh H.E.M. Editor, "Polyester", In Tech, Croatia, pp-167-198.
- 3- Batikha, M. (2008). "Strengthening of thin metallic cylindrical shells using fiber reinforced polymers", Ph. D. Thesis, Edinburgh, Scotland, UK.
- 4- Beuerman T.E. (2009). "Inventory of Repairing and Strengthening Techniques for Masonry Arch Bridges", Master's Thesis, University: Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.
- 5- BS EN 1992-1 (2004), Eurocode2, "Design of Concrete Structures", Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- 6- Bukhari, I; Vollum, R; Ahmad, S and Sagasetta, J. (2010)." Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP", Magazine of Concrete Research, 62, No. 1, January 65-77.
- 7- Concrete Society, (2004), "Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials", Technical Report 55, UK.
- 8- Jankowiak, T and Lodygowski, T. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model.
- 9- Khalifa, A. M. (1999). "SHEAR PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH ADVANCED COMPOSITES". Ph. D. Thesis, University of Missouri-Rolla, USA.
- 10- Lu, X.Z; Teng, J.G; Ye, L.P; and Jiang, J.J. (2005). "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete". Engineering Structures, Vol. 27, No. 6, pp.381-389.