

تقوية وإعادة تأهيل الأعضاء الإنشائية باستخدام ألياف البوليمر الكاربونية (مراجعة)

خلف ابراهيم محمد
kimjebouri@uomosul.edu.iq

اسلام عبدالله عزيز
islamabd@uomosul.edu.iq

جامعة الموصل - كلية الهندسة - قسم الهندسة المدنية

تاريخ القبول: 3/10/2021

تاريخ الاستلام: 26/6/2021

الخلاصة

تعتبر تقنية استخدام الياق البوليمر الكاربونية في تقوية وإعادة تأهيل الأعضاء الإنشائية من التقنيات الحديثة التي أثبتت فاعليتها في مختلف مشاريع الهندسة المدنية، فمن هذا المنطلق جاءت هذه المراجعة لتوضيح مقدار الفائدة العملية من استخدام هذه التقنية لإطلاع الباحثين والعاملين في قطاع الإنشاءات عليها ولتوفير مصادر حديثة للراغبين بإجراء المزيد من الأبحاث في مجال تقوية وإعادة تأهيل الأعضاء الإنشائية الخرسانية والحديدية والمركبة في الإنشاء والقض والمقواه بالياق البوليمر الكاربونية خارجياً أو داخلياً.

الكلمات الدالة

الياق الكاربون؛ إنثناء؛ قض؛ أعتاب خرسانية؛ أعتاب مركبة.

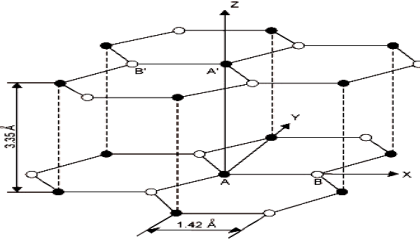
This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
<https://rengj.mosuljournals.com>

1- المقدمة

إن الأعضاء الإنشائية معرضة للفشل لأسباب عديدة منها وجود أخطاء في التصميم والمكتشفة بعد عملية التنفيذ أو نتيجة للتنفيذ غير الجيد أو نتيجة الاعتماد في التصميم أو التنفيذ على مواصفات ومعايير قديمة أصبحت غير أمينة في الوقت الحالي وبما يتناسب مع طرفة البناء الحديث والمعاصر، أو قد يكون سبب الفشل لأحمال إضافية لم توضع في الحسبان عند عملية التصميم كأضافة طوابق جديدة للبنىات المتعددة الطوابق أو حدوث زيادة غير متوقعة في الحجم المروري للمركبات بالنسبة للجسور الموجودة على الطرق السريعة فأصبح من الضروري إبتكار تقنية جديدة تعمل على تقوية المنشآت الخرسانية والحديدية على حد سواء قبل تعرضها للفشل أو إعادة تأهيلها بعد تضررها [1]. إن الموضوع الرئيسي لهذه المراجعة والمختلف عن المراجعات السابقة التي تناولها الباحثين هو التركيز على جميع الأعضاء الإنشائية التي يتعامل معها المهندس المدني في مختلف المشاريع الإنشائية والتي يتم تدعيمها أو إعادة تأهيلها بالياق البوليمر الكاربونية.

فمنذ منتصف ثمانينات القرن العشرين المنصرم ركز الباحثون على استخدام ألياف البوليمر الكاربونية (CFRP) مع الأعضاء المعدنية فضلاً عن الأعضاء الخشبية والخرسانية المسلحة [2]. فقد تم استخدام ألياف البوليمر بنجاح في تقوية مقاومة الإنثناء والقض للأعتاب الخرسانية المسلحة فضلاً عن زيادة مقاومة الإنضغاط للأعضاء الخرسانية المعرضة للضغط فضلاً عن ذلك فإن ألياف البوليمر تمتاز بمقاومة الشد العالية والتي تزيد في بعض الأنواع عن 1200MPa فضلاً عن خفة في الوزن ومقاومة التآكل الناتج من العوامل الكيميائية والظروف البيئية والكثافة الواطنة والتي تعادل (1/15) من كثافة الحديد، وكذلك قللت من كلفة الإنشاء للأيدي العاملة مقارنة بالمواد الأخرى كصفائح الحديد فضلاً عن سهولة قطع هذه الألياف بالأحجام المطلوبة في موقع العمل، كل تلك المميزات جعلتها تستخدم على نطاق واسع في تقوية المنشآت الحديدية والأعضاء الخرسانية على حد سواء [3]. إن تقنية استخدام ألياف البوليمر تم إختبارها لأول مرة عام 1984 في المختبر الإتحادي السويسري للبحوث وفحص المواد (Eidgenössische Materialprüfungs-und Forschungs Anstalt) إذ تم إختبار أعتاب خرسانية مسلحة مقواه بألياف البوليمر الكاربونية (CFRP) فكانت الميزة الرئيسية لنتائج الإختبار هي قابلية التحمل العالية للشد مقارنة مع وزنها بالإضافة إلى

المقاومة العالية للتآكل والظروف البيئية [4]. تتكون ألياف البوليمر الكاربونية من الكاربون ونسبة 92% من الوزن الكلي للألياف [5]، تصنع هذه الألياف إما من أسفلت الفحم (Coal Asphalt)، أو من مادة كيميائية (Poly-Acrylic Nitril (PAN)) وكلا النوعين يتكون من شعيرات الكرافت النقي الذي تعتمد خصائصها بشكل دقيق على تركيب الشعيرات وهيئتها، قد تكون هذه الشعيرات منظممة باتجاه واحد، وحينها تسمى (Uni-Directional Fabrics) أو شعيراتها باتجاهات متعددة وتسمى (Multi-Directional Fabrics) [6]. والشكل رقم (1) يوضح التركيب البلوري للكرافت النقي [6].



شكل رقم (1): التركيب البلوري للكرافت النقي [6]

سيركز البحث الحالي على تسليط الضوء للفائدة المستحصلة من تقوية مناطق الإنثناء والقض للأعضاء الإنشائية بالياق البوليمر الكاربونية من خلال استعراض البحوث العملية في هذا المجال بالإضافة إلى تأثير ألياف الكاربون في إعادة تأهيل الأعضاء الخرسانية

2- تقوية مناطق الإنثناء في الأعضاء الخرسانية بألياف الكاربون

قدم الباحثان [Lu and Shi 2007] [7] دراسة حول تأثير تغليف العتبات بالياق الكاربون (CFRP) في مقاومة الإنثناء، فقد قام الباحثان بتجهيز أربع عتبات خرسانية على شكل حرف (T)، واحدة من هذه العتبات عدت عتبة سيطرة والعتبات الثلاث الأخرى تم تقويتها بالياق الكاربون، و العتبة الثانية تم اضافة طبقة واحدة من ألياف الكاربون، و العتبات الثالثة والرابعة قويتا بطبقة واحدة من الياق الكاربون مع وضع شرائط على شكل حرف (U) على جانبي العتبة وبعد الفحص استنتج الباحثان بان التقوية بالياق الكاربون (CFRP) تعمل على زيادة جساءة العتبة الخرسانية بقيمة تتراوح ما بين 14.9% إلى

1- الفشل بمقاومة الانثناء يعتمد على كمية حديد التسليح وكمية الياق الكربون، إذ إن جميع العتبات التي عرضها (mm) 305 (152, 230)، ومقواة بشريحتين من الياق الكربون فشلت بحديد التسليح، وقد وصل حديد التسليح الى نقطة الخضوع، ثم تبع ذلك الفشل فشل بالخرسانة مع بقاء الياق الكربون على تماسك مع الخرسانة دون ان يحصل فصل بينهما، ويمكن ان يقال ان هذه العتبات فشلت في منطقة الانضغاط. والعتبات التي عرضها (305mm) ومقواة بشريحة واحدة من الياق الكربون فشلت بحديد التسليح، وقد وصل الى نقطة الخضوع، ثم تبع ذلك الفشل انقطاع في الياق الكربون (CFRP). ويمكن ان يقال ان هذه العتبات فشلت في الياق الكربون. وفي جميع العتبات السابقة لم يحصل فشل بالربط بين الياق الكربون (CFRP) والخرسانة.

2- جميع العتبات المقواة بوساطة الياق الكربون فشلت بحمل اكبر من الحمل الذي فشلت به عتبات السيطرة. إذ عند تقوية العتبات الخرسانية بالياق الكربون (CFRP) ازدادت مقاومة الخضوع من (9%) الى (30%).

ومن البحوث التي أخذت بنظر الإعتبار تأثير الأحمال التكرارية والدورية والمترابطة وتأثيرها في مقاومة التحمل، ونسبة المطيلية للعتبات الخرسانية المسلحة والمغلطة خارجياً بالياق البوليمر الكربونية ماقدمة الباحث [10] [Hassan 2007] من دراسة تضمنت صب (10) عتبات خرسانية بطول (1520mm) وذات مقطع مستطيل بارتفاع (180mm)، وعرض (100mm)، وجميع العتبات مسلحة داخلياً بحلقات من الحديد بحيث يتجنب فيها فشل القص، الأربع عتبات الأولى فحصت تحت أحمال تزايدية لغاية الفشل، فقد تركت إحدى هذه العتبات بدون تغليف خارجي بالياق الكربون واعتبرت أنموذج السيطرة أما العتبات الثلاث المتبقية فغلقت من الأسفل بشريط من الألياف الكربونية ذي سمك (0.12mm) وبعرض (70,30,50)mm على التوالي، والعتبات الست المتبقية فحصت خمس منها تحت أحمال متكررة ثابتة والعتبة العاشرة الأخيرة فحصت تحت أحمال دورية،

بعد فحص هذه العتبات تحت نقطتي التحميل استنتج الباحث ما يأتي:

1- إن التغليف الخارجي بشرائط من الياق الكربون يعمل على تحسين سلوك العتبات الخرسانية، وتقويتها بنسب تعتمد على عرض شرائط التغليف ونوع الأحمال.

2- العتبات المغلطة خارجياً والمعرضة إلى أحمال تزايدية ازدادت فيها قيم التحميل القصوى بمقدار (28%-40%) نسبة لعتبة السيطرة على الرغم من نقصان نسب مطيليتها بمقدار (27%-30%). العتبة المغلطة التي فحصت تحت دورتين من الأحمال المتكررة ازداد فيها التحمل الأقصى بمقدار 68% مع نقصان في نسبة المطيلية بمقدار 45%، أما العتبات المغلطة التي فحصت تحت تأثير خمس دورات ثابتة من الأحمال المتكررة، فقد ازداد فيها التحمل الأقصى بمقدار (52%-66%) مع نقصان بمقدار (34%-66%) في نسبة مطيليتها هذا مقارنة بالعتبة غير المغلطة والتي فحصت بدورتين من الأحمال المتكررة.

قام [11] [El.Sefy et al. 2016] بإجراء دراسة عملية ل (5) نماذج من البلاطات الخرسانية بأبعاد (6.4*0.5*0.125)m، تم تقوية (4) نماذج بالياق البوليمر الكربونية بطوال ومواقع مختلفة كما موضح في شكل (3)، والعتب الخامس اعتبر عتب سيطرة وظهرت النتائج زيادة في حمل الفشل بنسبة (6.9-53)% وزيادة في الجساءة وصلت الى 40% بالمقارنة مع عتب السيطرة بالإضافة الى تقليل قيمة الأود الوسطي.

16.1%، وان التقوية بالياق الكربون (CFRP) تعمل على التقليل من ارهاق العتبة الخرسانية تحت تأثير الاحمال الدورية، وهذا التقليل يعتمد على قوة الترابط بين الياق الكربون والعتبة الخرسانية. قدم الباحثان [8] [Gamino and Bittencourt 2007] دراسة حول سلوك العتبات في مقاومة الانثناء عند تقويتها بنوعين من الياق الكربون، وذلك بفحص (16) عتبة خرسانية مسلحة بطول (1600mm) وذات مقطع مستطيل ابعاده (mm) (75*150)، قسمت الى عتبتين سيطرة (14) عتبة مقواة من الاسفل قسمت الى مجموعتين تم تقويتها بنوعين مختلفين من الياق الكربون وكما يأتي: (المجموعة الاولى) تتالف من ثمانية عتبات تمت التقوية بنوع من الياق الكربون يطلق عليه (Sika CFRP composites) وكان التغليف بطبقة واحدة من الاسفل. و (المجموعة الثانية) تالف من ست عتبات تم اضافة نوعية اخرى من الالفاق يطلق عليها ب (Fosfiber CFRP composites) عتبة واحدة غلقت بطبقتين من الياق الكربون، والعتبات الأخرى غلقت بطبقة واحدة فقط. ثلاث منها كان التغليف من الاسفل غير مستمر على طول فضاء العتبة الخرسانية، إذ كان منقطعاً في منتصف العتبة وكان طول التوصيل مابين قطعتي الياق الكربون على جانبي منتصف العتبة الخرسانية (100 , 150 and 200 mm) على التوالي. وفي جميع العتبات الخرسانية كانت قوة مقاومة الانضغاط للخرسانة (45MPa)، و (fy=640 MPa) لحديد التسليح المستخدم، عند فحص النماذج وبعد تحليل النتائج استنتج الباحثان ما يأتي:-

1- نماذج المجموعة الاولى:-

أ- الزيادة في مقاومة الانثناء للنماذج اكثر من (40%) عن عتبات السيطرة كمعدل لثمانتي عتبات مقواة.

ب- الاستطالة في ألياف الكربون من نوع (Sika CFRP composites) في منتصف العتبة الخرسانية كان (1.22%).

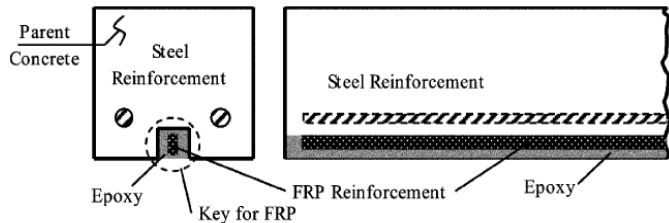
2- نماذج المجموعة الثانية:-

أ- الزيادة في مقاومة الانثناء للعتبات المغلطة بطبقة واحدة اكثر من (21%) عن عتبات السيطرة كمعدل للعتبتين.

ب- الزيادة في مقاومة الانثناء للعتبة المقواة بطبقتين من الياق الكربون اكثر من (53%).

ج- التوصيل بين قطعتي الياق الكربون ب (100mm) سوف يعطي تصرفاً لالياق الكربون، كانها لو كانت مستمرة دون انقطاع بالمنتصف.

قام [9] [Joseph et al. 2007]، بفحص (15) عتبة خرسانية مسلحة حقيقية الأبعاد بعدما اجري عليها عملية تقوية لمقاومة الانثناء بوساطة الياق الكربون (CFRP)، وذلك بعمل شق على طول العتبة وفي منتصفها من السطح السفلي لها (اي باتجاه الشد للعتبة)، وهذه العملية يطلق عليها (near-surface mounted fiber reinforced polymer NSM FRP) شكل (2)، ان استخدام هذه التقنية (NSM FRP) تزيد من قوة الترابط بين ألياف الكربون والخرسانة، وذلك لأن الياق الكربون محاطة من ثلاث جهات، مما يؤدي الى زيادة التبادل بالقوة بين الالفاق والخرسانة المحيطة. والمتغيرات التي اعتمد عليها الباحثون هي كمية الياق الكربون ونسبة حديد التسليح وابعاد المقطع. وصممت هذه العتبات لكي تفشل في مقاومة الانثناء.

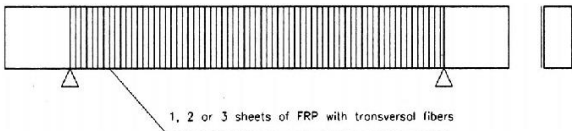


الشكل (2): يوضح موقع الشق في النماذج [9].

وتم فحص النماذج تحت اربعة احمال متركزة، وموقع هذه الاحمال اختير على اساس ان النسبة بين منطقة القص الى عمق التسليح (av/ds=8.4)، واستنتج الباحثون مايلي

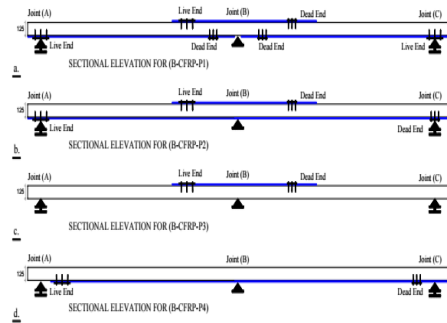
أما الدراسة التي أجراها [16] [Deniaud and Cheng 2001] فكانت تتحرى معرفة تأثير التغليف بألياف الكربون في مقاومة القص للعتبات الخرسانية ذات مقطع (T-section)، وذلك من خلال ثلاث عتبات خرسانية بطول 2700mm، وبارتفاع 205mm وتم تسليح هذه العتبات بالحديد الطولي فقط، لتجنب فشلها بالانثناء ولم تسليح بحلقات لمقاومة القص، اعتبرت العتبة الأولى أنموذج للسيطرة، إذ تركت بدون تغليف. أما العتبة الثانية فغلفت بصفائح من الألياف الكربونية في منطقتي الانثناء والقص بالكامل أي على شكل (-U wrap). أما العتبة الثالثة فقد تم تغليفها أيضاً بصفائح من ألياف الكربون، كما في العتبة الثانية ولكن مع وجود التثبيت الميكانيكي (Anchorage) بواسطة البراغي لنهايات الصفيحة الكربونية على سطح الخرسانة في جانبي العتبة من الأعلى، وبعد فحص هذه العتبات تحت أربعة أحمال متركزة وجد الباحثون أن حمل الفشل للعتبة الثانية المغلفة بصفيحة كربونية وبدون تثبيت ازداد بمقدار 72% مقارنة بالعتبة الأولى (أنموذج السيطرة) وحدث الفشل فيها بانفصال الصفيحة الكربونية عن سطح الخرسانة، في حين لوحظ أن التثبيت (Anchorage) كان السبب في زيادة حمل الفشل في العتبة الثالثة وبمقدار 94%، مقارنة بأنموذج السيطرة وتغير الفشل الحاصل من انفصال الألياف الذي حدث في العتبة الثانية إلى تمزق صفائح ألياف الكربون (fiber rupture).

قام الباحثان [17] [Pellegrino and Modena 2002] بدراسة لمعرفة تأثير التسليح الداخلي بحلقات الحديد ضد قوى القص (Stirrups) في العتبات الخرسانية المسلحة والمصممة على أن تصل مقاومتها القصوى للقص قبل الانثناء، وأجريت هذه الدراسة لعشرة عتبات خرسانية بطول 2700mm، وارتفاع 300mm، وعرض 150mm، اثنتان من هذه العتبات تركت بدون تسليح داخلي ضد قوى القص وبدون تغليف خارجي باستخدام الألياف أيضاً وعتبتان أخران تم تسليحهما داخلياً باستخدام حلقات حديد ضد قوى القص وبدون تغليف خارجي بالألياف، إذ اعتبرت هذه العتبات نماذج سيطرة. أما بقية العتبات فتم تغليفها خارجياً بالألياف الكربونية ومن جانبي العتبات فقط وبزاوية (90°) نسبة للمحور الطولي للعتبة شكل (4) والمتغير بين هذه العتبات هو عدد طبقات التغليف، فقد تم التغليف بطبقة وطبقتين وثلاث طبقات هذا مع وجود نسبة ثابتة من حديد التسليح (Stirrups) في العتبات لمقاومة القص وبعد فحص هذه العتبات تحت أربعة أحمال متركزة، استنتج الباحثان من تحليل النتائج أن التغليف الخارجي بصفائح الألياف الكربونية يزيد من مقاومة القص للعتبات، وينسب زيادة تكون أكثر عند التغليف بالألياف الكربونية، ونسب هذه الزيادة تعتمد أيضاً على نسبة حلقات حديد القص (stirrups) في العتبات إلى الألياف المستخدمة في التغليف الخارجي، إذ إن بزيادة نسبة حديد القص إلى الألياف في العتبة تقل الزيادة الحاصلة في مقاومة القص، أي إن كفاءة التغليف بالألياف تقل في العتبات المصممة لمقاومة القص، كذلك تعتمد نسبة الزيادة في مقاومة القص أيضاً على شكل الفشل، إذ إن جميع العتبات حدث فيها الفشل بانفصال ألياف الكربون عن سطح الخرسانة، واعتقد الباحثان أنه لو كان هناك تثبيت (Anchors) للألياف على سطح الخرسانة لتغير شكل الفشل، وازدادت كفاءة التغليف بذلك



الشكل(4): شكل التغليف الخارجي للعتبات [17].

قدم [18] [Buyukozturk et al. 2002] دراسة حول دور التثبيت بشرائط الألياف (Anchorage) من خلال فحصهم لسبع عتبات خرسانية (A,B,C,D,E,F,R) طول الاعتاب 1500mm، والعرض 150mm، والارتفاع 180mm، واحدة من هذه العتبات (A) أخذت كأنموذج للسيطرة وتركبت بدون تغليف، وجميع العتبات المتبقية تمت تقويتها من الأسفل في منطقة الشد لمقاومة الانثناء بطبقة من ألياف الكربون وبطول 1270mm، وعرض 38mm، وسمك 1.2mm، إلا أن حديد القص في العتبة (C) أكثر من حديد القص في العتبة (B)، أما



الشكل(3): التغليف بالألياف للبلطات [11].

قام [12] [Fawzy k. et al. 2021] باستخدام [10 نماذج] بطول (2m) وبأبعاد (200*150) mm تم تقويتها في منطقة الشد بألياف البوليمر الكربونية وبعد إجراء الفحص وجد زيادة في قيمة حمل الفشل وبنسب (31.8-71.5)% بالمقارنة بالنموذج الغير مغلف بالألياف.

قام [13] [Mashrei M.A. & Sultan A. 2019] بصب (13) نموذج واحد منها اعتبرت عتب سيطرة بطول (1200 mm) وعرض (130mm) وعمق (220mm) تمت تقويتها بأطوال وطبقات مختلفة من الأسفل وبينت نتائج الفحص ان الياف الكربون عملت على زيادة التحمل بالإضافة الى تاخير ظهور الشق الاول وتقليل الاود الوسطي.

3- تقوية مناطق القص للاعضاء الخرسانية بالياف الكربون .

قام [14] [Grace et al. 1998] بمقارنة حول استخدام قضبان من (حديد التسليح، وألياف الكربون) في تسليح طولي لمقاومة الانثناء وحلقات (Stirrups) لمقاومة القص، وتمت هذه الدراسة على سبع عتبات خرسانية مستطيلة المقطع بأبعاد (150*350)mm، وطول 2896mm. فحصت العتبات بتسليط حمل مركز في المنتصف واستنتج الباحثون ما يأتي :-

1- إن جميع العتبات فشلت بحمل مقارب فيما بينها، وان الفرق بين أعلى حمل فشلي، وأقل حمل فشلي لا يتجاوز 10% في حين هناك فرق بين النماذج من حيث شكل الفشل، ونسبة المطيلية فقد استنتج الباحثون أن العتبات المسلحة بCFRP لمقاومة القص والانثناء تقل فيها نسبة المطيلية بشكل ملحوظ مقارنة ببقية النماذج .

2- من ملاحظة منحنيات علاقة (Load-Deflection) للعتبات استنتج الباحثون أن هناك نقصاناً في طاقة الامتصاص، وزيادة في الأود للعتبات المسلحة بحلقات من ألياف الكربون مقارنة بالعتبات المسلحة بحلقات الحديد ولنفس حديد تسليح الرئيسي.

قدم [15] [Li et al. 2001] دراسة لمعرفة دور التغليف الخارجي بألياف الكربون على مقاومة القص والانثناء لخمس عتبات خرسانية بطول 1350mm، وبعرض 130mm، وارتفاع 200mm والمسافة بين المساند 1100mm، العتبات مسلحة بقضبان الحديد لمقاومة القص والانثناء وتمت تقوية جميع العتبات بطبقة من ألياف الكربون بعرض 120 mm في منطقة الانثناء من الأسفل، أما منطقة القص لجميع العتبات عدا عتبة السيطرة، فتمت تقويتها أيضاً بصفائح من ألياف الكربون، وبارتفاعات مختلفة وفحصت جميع العتبات تحت أربعة أحمال متركزة واستنتج الباحثون من خلال تحليل النتائج ما يأتي:-

1- حمل الفشل (Failure Load) والجساءة (Stiffness) للعتبات تزداد مع زيادة مساحة الصفيحة الكربونية المغلفة للعتبة.
2- إن الزيادة في حمل الفشل للعتبات المغلفة في منطقتي الانثناء والقص ليست كبيرة، مقارنة بالعتبات المغلفة في منطقة الانثناء فقط.
3- إن أعلى نسبة زيادة في قيمة حمل الفشل بالانثناء وصلت إلى (11%)، مقارنة بحمل الفشل لعتبة السيطرة أي إن التغليف الجانبي المتمثل بتغليف منطقة القص ليس له تأثير كبير على نتائج حمل الفشل بالانثناء، ولكن يؤخر من ظهور الشقوق الابتدائية الحاصلة في العتبة.

السحب المثبت في نهايات التثبيت (Anchor pullout) ولكن عند حمل أعلى من الأول.

قام الباحث [20] [Abd 2021] بإجراء دراسة عملية على (12) نموذج بأبعاد (10*20*110)cm صممت بحيث يكون الفشل بالقص قسمت النماذج الى اربع مجاميع، كل مجموعة (3 نماذج) وكانت المسافة بين حلقات التسليح (5,10,15)cm على التوالي المجموعة الاولى اعتبرت اعتاب سيطرة، المجموعة الثانية غلفت باللياف الكربون على شكل حلقات، المجموعة الثالثة غلفت باللياف كربون مائلة، المجموعة الرابعة كانت الاللياف على شكل حرف (x) كما موضح في شكل (6).

بينت نتائج الدراسة ان شكل التغليف بالاللياف له دور بزيادة حمل الفشل لمقاومة القص بالإضافة الى تقليل الاود فكانت اعلى زيادة بالتحمل بالمقارنة مع اعتاب السيطرة هي نماذج التغليف (x) تليها المائلة ثم الحلقات.



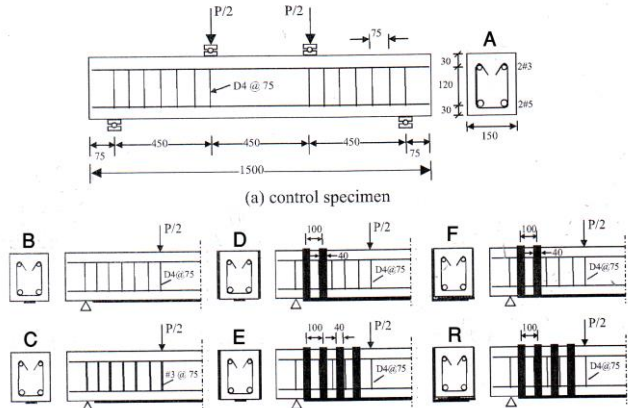
الشكل (6): اشكال التغليف للعتبات [20].

قام [21] [Mhanna H.H. et al. 2019] بصب (6 نماذج) على شكل مقطع (T) بطول (2m) وعمق كلي (350mm) تم تقوية مناطق القص بأطوال وطبقات مختلفة من ألياف الكربون ، بينت نتائج الفحص ان الاللياف عملت على زيادة تحمل قوى القص بالإضافة الى تاخير ظهور الشقوق بسبب قوى القص.

قام الباحث [22] [Murad Y. 2018] بصب (5 نماذج) واحدة منها كانت عتب سيطرة بطول (2m) وعمق (20cm) وعرض (15cm) ، تم تغليفها باللياف الكربون بمناطق القص بزوايا مختلفة

العتبتان (E and D) فتمت تقويتها من الجانبين بشرائط ألياف الكربون بعرض 40mm لمقاومة القص، والعتبتان (R and F) تمت أيضا تقويتها بشرائط لمقاومة القص، ولكن على شكل (L-shape) إذ تعمل هذه الشرائط على مقاومة قوى القص فضلاً عن تثبيت طبقة الاللياف التي وضعت من الأسفل لمنعها من الانفصال كما موضح في شكل (5).

بعد فحص هذه العتبات تحت أربعة أحمال متمركزة لاحظ الباحثون أن عتبة السيطرة فشلت بالقص. أما العتبات المغلفة ففشلت بالقص أيضاً مع انفصال ألياف الكربون (Debonding) عن سطح الخرسانة، ولكن مع زيادة في حمل الفشل مقارنة بنموذج السيطرة، بنسب زيادة بلغت 5% للعتبة (B)، و20% في العتبة (C)، و17% للعتبة (D) المغلفة بشريطين لمقاومة القص و20% للعتبة (E)، و29% للعتبة (F)، في حين كانت أعلى زيادة 44% للعتبة (R) المغلفة بفضاء قص كامل على شكل (L-shape)، ومن ملاحظة منحنيات علاقة (الحمل - الأود) للعتبات ، استنتج الباحثون أن تثبيت الاللياف على سطح الخرسانة يزيد من جساءتها وطاقتها للامتصاص المتمثلة بالمساحة تحت المنحني، وفي نفس الوقت يزيد من قابلية التحمل للعتبات من خلال منع انفصال طبقة الكربون عن سطح الخرسانة في وقت مبكر من التحميل.



الشكل (5): تفاصيل التسليح والتغليف الخارجي للعتبات [18].

وقام [19] [Micelli et al. 2002] بدراسة ميدانية حول استخدام صفائح من ألياف البوليمر في تغليف العتبات الخرسانية المسلحة ذات مقطع (T) وتأثيرها في مقاومة القص، حيث قاموا بقطع ست عتبات خرسانية ذات مقطع (T) من بناية مستشفى (Malcolm Bliss) التي شيدت في عام 1964 وحدث إحدى هذه العتبات (JS1) أنموذجاً للسيطرة، وتركت بدون تغليف. أما العتبة الثاني (JS2) فغلقت بطبقة واحدة من ألياف الكربون من الأسفل والجوانب (U-shape) وعلى طول الفضاء مع طبقة أخرى من نفس الألياف بعرض 102mm في منطقة العزم الموجب (أسفل العتبة) وطبقة بعرض 508mm في منطقة العزم السالب (أعلى العتبة من النهايات). أما العتبة الثالثة (JS3) غلفت تماماً كالعتبة الثانية ولكن مع تثبيت ميكانيكي لنهايات الاللياف على سطح الخرسانة وذلك عن طريق عمل حفرة طولية (groove) في منطقة تقاطع الشفة (web) مع طرف العتبة (flange)، ثم وضع قضيب من الألياف الزجاج بقطر 13mm في الفجوة، ومن ثم حقن الفجوة بالايبيوكسي بعد وضع طبقة التغليف فحصت العتبات بتسليط الحمل على مسافة 1219mm من مسند اليسار وأظهرت نتائج الفحص ما يأتي :-

1- إن جميع العتبات أعطت زيادة في الجساءة ومقاومة القص مقارنة بالأنموذج غير المغلف وبنسب تتراوح بين 12% للعتبة (JS2A) المغلفة بطبقة واحدة من ألياف الكربون على شكل (U-wrap) وبدون تثبيت النهايات، و39% للعتبة (JS5A) المغلفة بطبقتين من ألياف الكربون التي على شكل (U-wrap) مع تثبيت النهايات (Anchorage) لطبقة الاللياف الكربونية على سطح الخرسانة.

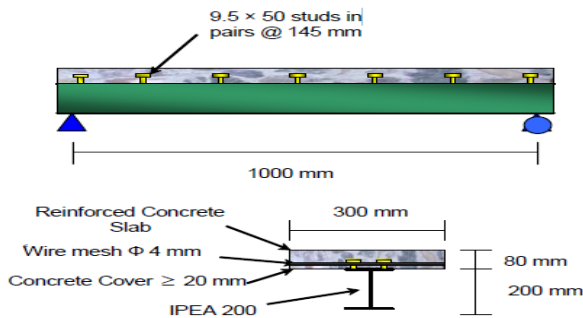
2- الفشل في العتبات غير مثبتة النهايات كان بانفصال الاللياف عن سطح الخرسانة (debonding). أما العتبات المثبتة فشلت بسبب

الأنموذج وكان التغليف يغطي منطقة الشد فضلاً عن إستمرار طبقة التقوية ل(50mm) من الجهتين لمنطقة ال(web) للأنموذج. أما بقية عتبات المجموعة وعددها (2نموذج) فقد تمت تقويتها لتحمل الإثناء كما في الأعتاب السابقة إلا أن الإختلاف كان بطول شرائح التقوية والتي لم تكن مستمرة على طول الأنموذج وإنما على مسافات متقطعة بعد إجراء الفحص على النماذج وتحليل النتائج إستنتج الباحثون مايلي:-

1- بينت الفحوصات أن في جميع الأعتاب المقواة بواسطة ألياف البوليمر الكربونية حدث فشل الربط لشرائح التقوية بعد وصول الشفة السفلى للمقطع الحديدي لإجهاد الخضوع.

2- الأعتاب ذات شرائح التقوية بألياف الكربون غير المستمرة على طول الأنموذج كان تحملها للإثناء أقل من الأعتاب ذات شرائح التقوية المستمرة على طول الأنموذج.

قام الباحث [25] [Kadhum2009] بفحص 12 عتباً مركباً قصير الفضاء بطول (1m) أعتمد الباحث على نموذجين من الأعتاب المركبة (أعتاب سيطرة) دون تقويتهم بألياف الكربون تم تقوية النماذج الستة الأولى بألياف بوليمر كربونية من نوع (Sika CarboDur S512) في الوجه السفلي من الشفة السفلى وبأستخدام الإيبوكسي من نوع (Sika dur 30) كمادة رابطة وبعرض تغليف للشريحة الواحدة قدرة (50mm) ولجميع النماذج وكان الإختلاف لهذه النماذج هو في طول وعدد طبقات شرائح التقوية بألياف الكربون أما النماذج المتبقية وعددها (4 نماذج) فقد تم استخدام وسائل الربط الميكانيكية المتمثلة بالربط بالبراغي بقطر (10.5mm) لربط ألياف الكربون مع الشفة السفلى للعتب المركب فضلاً عن الإيبوكسي، وكانت التقوية بنفس النوع من ألياف البوليمر الكربونية وبفرض العرض للشرائح (50mm) والإختلاف كان بعدد طبقات التغليف وطول التغليف وبعد فحص النماذج وتحليل النتائج أستنتج الباحث بأن نماذج الأعتاب المركبة الستة الأولى والتي أستخدم فيها الإيبوكسي كمادة رابطة أستنتج بأن ألياف البوليمر ليس لها تأثير في ظهور الشق الأول في الجزء الخرساني من العتب المركب ولكن فشل السحق لخرسانة الأعتاب حدثت بعد مدة من إنفصال الألياف عن المقطع الحديدي . ولوحظ كذلك زيادة لحمل الفشل بمقدار (20%) بالمقارنة مع اعتاب السيطرة. أما نماذج الأعتاب المركبة التي أستخدم فيها الربط الميكانيكي بالبراغي والإيبوكسي فقد قورنت قابلية التحمل مع عتب السيطرة إذ كانت أفضل النتائج فقد بلغت بزيادة (41.27%)، فضلاً عن تقليل مقدار الأود الوسطي، ولم يلاحظ أي فشل بالربط لنماذج هذه المجموعة بين ألياف الكربون والشفة السفلى للمقطع الحديدي، والشكل التالي يوضح تفاصيل ابعاد النماذج مع التغليف.



بينت نتائج الفحص ان لالياف الكربون قابلية على زيادة تحمل القص وبنسب مختلفة حسب زاوية ميل التغليف.

4- تأثير التغليف الخارجي بألياف الكربون في مقاومة الإثناء للأعتاب المركبة

قام الباحث [23] [Shaar 2007] بإجراء دراسة عملية على مجموعة تتألف من (3) أعتاب مركبة رُمز لها (G1,G2,G3) كانت أبعاد النماذج الطول (6200mm) والمقطع الحديدي للعتب من النوع (W250 × 25) والجزء الكونكريتي من العتب (Slab) بسمك (65mm) وعرض (500mm) تم إستخدام نوعين مختلفين من ألياف البوليمر الكربونية لتقوية الأعتاب المركبة ورمز لها (C₁&C₂) وكان الإختلاف لهذين النوعين هو بمعامل المرونة (C₁=152 GPa) بينما (C₂=313 GPa) أي ضعف النوع الأول تقريباً وهذه القيم المختلفة لمعامل المرونة لألياف الكربون أدت الى إختلاف في قيم عزم القصور الذاتي المنقول للأعتاب (G2 وG3) وحدوث إختلاف في قيم الجساءة وحمل الخضوع وأقصى حمل لتحمل النماذج وكانت التقوية في منطقة الشد في الوجه السفلي من الشفة السفلى، تم أعتماد العتب (G1) كعتب سيطرة، وفي حالة العتب (G2) فقد تم تقويته بطبقتين من ألياف البوليمر الكربونية في الجزء الوسطي من الشفة السفلى من العتب، الطبقة الأولى بطول (4000mm) أي حوالي (67%) من الطول الكلي للنموذج (ثلثي الطول) وكانت أبعاد المقطع لطبقة ألياف البوليمر الكربونية هي (1.4×90mm) أما الطبقة الثانية فكانت بطول (1500mm) (ربع طول العتب) و أبعاد المقطع لطبقة ألياف البوليمر هي (1.4×50mm) وكانت الطبقتان من نوع (C₁).

أما العتب المركب (G3) فكانت التقوية بألياف البوليمر الكربونية شبيهة بما موجود في (G2) إلا أن الطبقة الثانية ذات الطول (1500mm) هي من نوع مختلف (C₂).

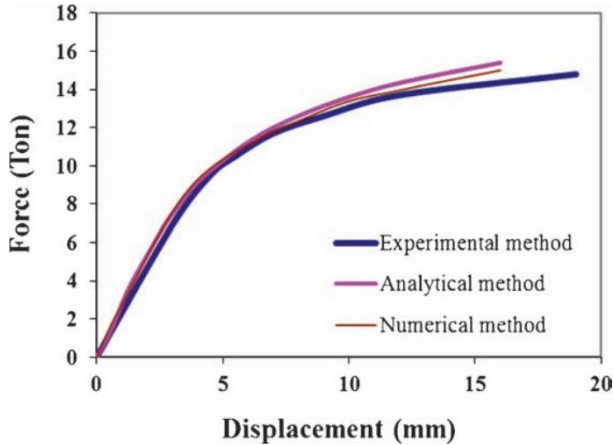
وكان الهدف من الدراسة العملية للباحث هو التحقق من تأثير التقوية بألياف البوليمر الكربونية للأعتاب المركبة والتي تكون أبعادها قريبة من الأبعاد الحقيقية، إذ أن طول النماذج أكثر من (6متر) والمقارنة بين أنواع مختلفة من ألياف البوليمر الكربونية. وبعد إجراء الفحص على النماذج وتحليل النتائج أستنتج الباحث مايلي:-

1- أن مقاومة الإثناء زادت بمقدار 50%، 51% ل (G2 وG3) على التوالي مقارنة بمقاومة الإثناء لعتب السيطرة (G1).

2- زاد حمل الخضوع المقاس بنسبة (14-21)% وزيادة في مقدار الجساءة بنسبة (17-19)% بالنسبة ل (G2 وG3) على التوالي بالمقارنة مع (G1).

3- لوحظ بأن الفشل للربط في طبقة التقوية الثانية لألياف البوليمر الكربونية ذات الأنواع المختلفة (C₁,C₂) الموجودة في العتب المركب (G3) تحدث قبل الفشل بالطبقات الموجودة في العتب المركب (G2) والتي كانت من نوع واحد (C₁) وكان فشل الربط للطبقة الثانية عند الأحمال (111 kN، 129kN) ل (G2 وG3) على التوالي ونتيجة للفشل المبكر بالربط لألياف البوليمر الكربونية (بالنسبة للطبقة الثانية) تعذر مقارنة تأثير استخدام أنواع مختلفة من ألياف الكربون على مقاومة الإثناء للأعتاب المركبة.

قام [24] [Silam et al. 2009] بصب (5) نماذج من الأعتاب المركبة، إذ كانت مواصفات المقطع الحديدي (tw=6.3mm, tf=9.5mm, b=74mm, h=160mm) والجزء الخرساني من العتب (Slab) ذو مواصفات (500mm width × 100mm thick) والطول الكلي لكل نموذج هو (1800mm) ويحتوي على صفين من روابط القص المسمارية بقطر (12mm) وارتفاع (50mm) لحمت على طول الشفة العليا استخدم الباحثون لتقوية مقاومة الإثناء لنماذج الأعتاب المركبة شرائح من ألياف البوليمر الكربونية وكانت من نوع Sikawrap Hex- (230c) تم إعتماد نموذج واحد كعتب سيطرة واحد الاعتاب تمت تقويته بطبقتين من ألياف البوليمر الكربونية وعلى طول الأنموذج وكان التغليف يغطي منطقة الشد فقط (Bottom Flange). والعتب الثاني تمت تقويته بطبقتين من ألياف البوليمر الكربونية وعلى طول



الشكل (8): علاقة الحمل-الانزياح [27].

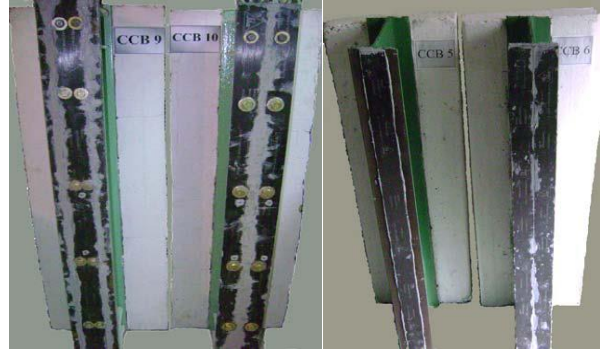
قام [28] [Subhani M. et al. 2020] بإجراء دراسة عملية على (6) أعتاب مركبة بطول (2m) وعرض السقف (500mm) والسمك (50mm) واحدة منها اعتبرت عتبة سيطرة والمقطع الحديدي للنماذج بارتفاع (155mm) وعرض (75mm) تم تقوية (5 نماذج) باللياف الكربون بمواقع مختلفة، توصلت الفحوصات العملية إلى زيادة في مقدار حمل الفشل بالمقارنة مع عتب السيطرة وكان مقدار الزيادة تتراوح بنسب (-0.38 إلى 41.22%) حسب موقع التغليف بالألياف بالإضافة إلى تقليل الانزلاق بين السقف الخرساني والمقطع الحديدي.

قدم [29] [Makhlouf M. 2019] دراسة عملية باستخدام (9) نماذج بطول (1.5m) تحتوي على فتحات في المقطع الحديدي تم تقوية (8 نماذج) منها باللياف البوليمر الكربونية، اثبتت الفحوصات العملية أن ألياف الكربون تعمل على زيادة التحمل وتقليل الانزياح الوسطي وبنسب مختلفة حسب موقع وعدد طبقات الألياف.

5- استخدام اليف الكربون لمقاومة الإنشاء للأعتاب ذات المقاطع الحديدية

قام [30] [Normashiri et al. 2010] بإجراء دراسة على أربعة أعتاب مكونة من مقاطع حديدية بطول (2350mm) لدراسة تأثير التقوية باللياف البوليمر الكربونية على مقاومة الإنشاء حيث رمز لنماذج الأعتاب الحديدية من (B1-B4) حيث ترك (B1) بدون أي تقوية (عتب سيطرة) و(B2) تمت تقوية باللياف الكربون وبأستعمال الإيبوكسي من نوع (Sikadur 30) كمادة رابطة والنموذجان (B3, B4) تمت تقويتهم باللياف الكربون ولكن بأستعمال الربط البراغي عدد (4) وبقطر (10mm) عند نهايات الأعتاب الحديدية بالإضافة إلى الإيبوكسي، أستخدم الباحثون ألياف الكربون من نوع (Sika CarboDur S512/80) وبطول (1500mm) وعرض (50mm) وسمك (1.2mm) ولطبقة واحدة للأعتاب المقواه بألياف الكربون وبعد فحص النماذج وتحليل النتائج أستنتج مايلي:-

زيادة في مقدار الحمل الأقصى للعتب (B2) بالمقارنة مع عتب السيطرة (B1) بنسبة (13.51%) وبنسبة (21.57%) كمعدل للأعتاب (B4, B3). كذلك لوحظ بأن الفشل الذي حدث لألياف الكربون في النموذج (B2) كان فشلاً بالربط (Debonding) وكذلك فشلاً بالإنشطار في وسط شريحة الألياف (Mid-Splitting) أما الفشل للنماذج المستخدمة فيها البراغي للربط (B3, B4) فضلاً عن فشل الربط (Debonding) والإنشطار في الوسط بشريحة الألياف (Mid-Splitting) فلو حظ بأن الألياف في منطقة الربط البراغي قد تعرضت للسحب نحو الخارج عند النهايات (End-Peeling out) كما موضح في الشكل (9).



الشكل (7): تفاصيل الأبعاد والتغليف للعتبات [25].

قدم الباحثان [26] [Al-Sulayfani and Aziz 2013] دراسة عملية شملت (14) عتب مركب وبطول (3000mm) تم تقويتها في منطقة الوتر (Web) بمساند (قطر 25mm) للتغلب على مشكلة الإنثناء (الإنبعاج) ، تم إعتداد نموذجين كأعتاب سيطرة وبقيّة النماذج تم توزيعها على ثلاث محاور رئيسية تمثل الدراسة العملية لهذا البحث وكما يلي:-

1- المحور الأول: التعرف على موقع التغليف لنماذج الأعتاب المركبة بألياف البوليمر الكربونية لإعطاء أفضل النتائج لمقاومة الإنثناء، حيث تم تخصيص (6 أعتاب مركبة) لهذا المحور تمت التقوية فيه على طول النماذج ولطبقة واحدة وبمواقع مختلفة.

2- المحور الثاني: التعرف على الطول الأمثل للتغليف بألياف البوليمر الكربونية، وخصص لهذا الجزء (3 أعتاب مركبة) تم التغليف فيها بأطوال مختلفة.

3- المحور الثالث: تأثير عدد طبقات التغليف بألياف البوليمر الكربونية على مقاومة الإنثناء للأعتاب المركبة، حيث تم تهيئة (3 أعتاب مركبة) لهذا المحور .

وبينت نتائج الفحص لنماذج الأعتاب المركبة فعالية ألياف الكربون في زيادة حمل الفشل بنسبة (11-36%) وتقليل الانزياح الوسطي بنسبة (7-29%) بالإضافة إلى تقليل الإنزلاق المقاس عند نهايات نماذج الأعتاب المركبة والحاصل بين الجزء الخرساني والمقطع الحديدي للأعتاب وإعتداداً على موقع وطول التغليف بالإضافة إلى عدد طبقات التغليف بألياف الكربون.

قام الباحثان [27] [Mosavi and Nik 2014] بتهيئة (5 نماذج من الأعتاب المركبة بطول (1.8m) وعرض السقف (45)cm وسمك (6.5)cm) وتم استخدام اليف البوليمر الكربونية بطول (1.5m) وعرض (7)cm في الجزء السفلي من الوتر Web، نموذجين اعتبرت أعتاب سيطرة وثلاثة تم تغليفها باليف الكربون.

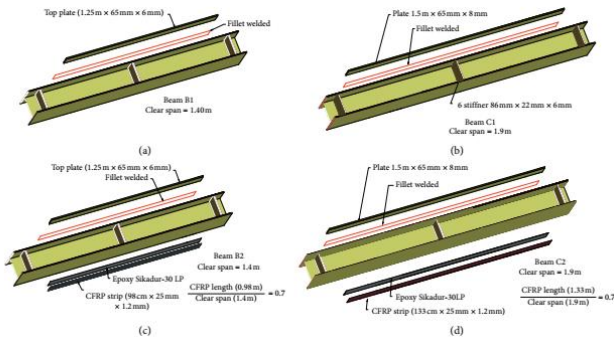
بينت النتائج العملية زيادة في قيمة حمل الفشل بنسبة (26%) بالمقارنة مع أعتاب السيطرة كذلك تقليل الانزياح الوسطي وزيادة في الجساءة بنسبة (25%) عملياً كذلك تم مقارنة نتائج الدراسة العملية مع نتائج معادلات عددية ودراسة نظرية باستخدام برنامج ANSYS وتم التوصل إلى توافق جيد بالنسبة لعلاقة الحمل-الانزياح كما موضح في الشكل (8) .



قام [33] [AL-Ridh et al. 2019] بتهيئة اربع نماذج لها نفس المقطع قسمت الى مجموعتين المجموعة الاولى طول الاعتاب الحديدية (1.9m) والمجموعة الثانية بطول (1.4)m كل مجموعة تم التغليف باللياف الكربون بمنطقة الشد من الاسفل بطول (70%) من طول النموذج كما موضح في الشكل رقم (10)، وبعد فحص النماذج وجد الباحثون زيادة في حمل الفشل مقارنة مع النماذج الغير مغلقة باللياف الفايبر وكانت نسبة الزيادة (38.88) و(52.17)% على التوالي بالاضافة الى زيادة في جساءة النماذج كذلك تبين بان قيمة الاود الوسطي والانفعال لنماذج المجموعة الثاني اقل من نماذج المجموعة الاولى .

فشل الربط للألياف (B2) فشل السحب للخارج للألياف (B3,B4)

الشكل(9): اشكال الفشل بالألياف [30]



الشكل(10): تفاصيل التغليف للعتبات الحديدية [33].

قام [34] [Faikha et al.2019] بتهيئة 6 عتبات حديدية بطول (0.8m) بهدف دراسة تقوية المقاطع الحديدية باللياف البوليمر الكربونية على مقاومة الانثناء كذلك على قيمة حمل الخضوع للمقاطع الحديدية ومقدار الاود الوسطي للنماذج والجدول رقم (1) يوضح تفاصيل النماذج المستخدمة من قبل الباحث، تم اختيار عتب سيطرة واحد و بقية النماذج تم تغليفها بثلاث طبقات كل طبقة بسبك (0.42mm) تم التغليف في مناطق مختلفة في الجزء السفلي للعتاب بينت النتائج العملية زيادة في حمل الفشل بنسب (1.5-8.5)% وزيادة في حمل الخضوع بنسب (1.25-10)% حسب موقع التغليف بالاللياف بالاضافة الى تقليل قيمة الاود الوسطي بالمقارنة مع عتب السيطرة.

جدول (1): تفاصيل النماذج للعتبات الحديدية [34].

Mass, M	8.90 kg/m
Sectional area, a	11.40 cm ²
Depth, D	100.00mm
Width of flange, B	50.00mm
Thickness of web, t	4.70 mm
Thickness of flange, l	7.00 mm
Maximum Flange slope, α	98.000
Radius at foot R ₁	9.00 mm
Radius at foot R ₂	4.50 mm
Moment of inertia about X-X axis, I _x	183.00 cm ⁴
Moment of inertia about Y-Y axis, I _y	12.90 cm ⁴
Radius of gyration about X-X axis, r _x	4.00 cm
Radius of gyration about Y-Y axis, r _y	1.05 cm
Modulus of section about X-X axis, Z _x	36.60 cm ³
Modulus of section about Y-Y axis, Z _y	5.16 cm ³

قام الباحث [35] [El.Mahdy G.M. 2019] بإجراء دراسة عملية لمعرفة سلوك الاعتاب ذات المقاطع الحديدية المقواه باللياف البوليمر الكربونية حيث تم استخدام (7) نماذج بطول (2.5m) وبأبعاد مقطع (150*150mm) وتم تقويتها في مناطق الشد من الاسفل باطوال وعدد طبقات مختلفة، وبعد اجراء الفحص تبين زيادة في حمل الفشل وتقليل الاود الوسطي.

قام الباحثان [36] [Jagtap P.R. & Pore S.M. 2020] باستخدام (4 نماذج) واحدة منها اعتبرت عتبة سيطرة بطول (1.5m) تم فحصها باسناد بسيط وتسليط حمل مركزي في الوسط بعد تقوية النماذج بالاللياف الكربون في منطقة الشد وباطوال مختلفة، وبعد اجراء الفحص كانت

قام [31] [Phares et al. 2003] بأجراء دراسة ميدانية لتقوية أحد الجسور (منشأ غير مركب) الموجود على نهر (Rhine) الذي يمر بين سويسرا والنمسا، وكان الطول الكلي للجسر (150ft) يتألف من (6) أعتاب ومواصفات المقطع الحديدي للأعتاب الخارجية هي (W27×48) وأما مواصفات المقطع الحديدي لبقية الأعتاب الداخلية فهي عتبتان (W27×91) وعتبتان (W27×98) موزعة بشكل متناظر حول (Center Line) للجسر. وبعد ظهور مشكلة زيادة في الحجم المروري على الجسر تم إختيار ألياف البوليمر الكربونية لتقوية الأعتاب الحديدية موقعا نتيجة لما تتمتع به من مميزات للاستعمال الخارجي المتمثل بمقاومة التآكل والظروف الجوية المتمثلة بالتعرض المباشر لأشعة الشمس والأمطار وغيرها من المميزات الأخرى، وجميع الأعتاب للجسر تمت تقوية المقاطع الحديدية في الوجه السفلي والعلوي من الشفة السفلى وإختبار قابلية التحمل للأعتاب الحديدية المقواة موقعا بألياف الكربون تمت في المرحلة الأولى دراسة سلوك الأعتاب الحديدية غير المقواة من خلال معرفة مقدار الاود الحاصل في الأعتاب عند حجم مروري معين. والمرحلة الثانية تمثلت بمقارنة الاود بعد التغليف عند زيادة الحجم المروري على الجسر ولستنتجنتاليتين (2004 و2005) فوجد بأن لألياف الكربون قابلية جيدة لتقليل الاود الحاصل نتيجة لأحمال المركبات فضلاً عن الإمكانية العالية لمقاومة الظروف الجوية والتآكل بمرور الزمن.

قام [32] [Normashiri et al. 2010] بأجراء فحص على 5 أعتاب مكونة من مقطع حديدي لمعرفة تأثير تقوية منطقة القص في الوتر (Web) للعتب الحديدي، إذ رمز للنماذج من (B1-B5) حيث ترك النموذج (B1) بدون تقوية بألياف البوليمر الكربونية (عتب سيطرة) والعتب الثاني (B2) تمت تقويته بثلاث شرائح من ألياف الكربون ومن الجهتين للنموذج إذ تمت تغطية مايعادل 72% من منطقة القص، والعتب (B3) تمت تقويته بشريحتين من ألياف الكربون ومن الجهتين أي تم تغطية 48% من منطقة القص للعتب الحديدي، والعتب (B4) تمت تقويته كما في العتب (B2) ولكن التغليف من جهة واحدة، أما بالنسبة للعتب الأخير (B5) فقد تم تقويته كما في العتب (B3) ولكن من جهة واحدة استخدمت ألياف بوليمر كربونية من نوع (Sika CarboDur S512/80) وأستخدم الإيبوكسي من نوع (Sikadur 30) كمادة رابطة بين المقطع الحديدي وألياف الكربون وكان طول النماذج المستخدمة هو (1000 mm).

وبعد فحص النماذج وتحليل النتائج أستنتج الباحثون مايلي:-

1- زيادة في مقدار الحمل الأقصى للأعتاب المقواة بألياف الكربون في منطقة (Web) بالمقارنة مع عتب السيطرة (B1) فكانت الزيادة (51.67%)، (51.41%)، (43.48%)، (35.89%) لكل من الأعتاب الحديدية (B2، B3، B4، B5) على التوالي.

2- لوحظ بأن مقاومة التحمل عند تقوية منطقة القص بمقدار 72% (العتب B2) و48% (العتب B3) من الجهتين لهما نفس مقدار الزيادة بالتحمل تقريباً (51.67%) و(51.41%).

3- كانت النماذج المقواة من الجانبين بألياف الكربون قد أعطت أفضل النتائج لتقليل الاود في وسط الأعتاب على الرغم من حدوث نوعين من الفشل لألياف الكربون المستخدمة لتقوية الأعتاب الحديدية الأول هو فشل بالربط (Debonding) والثاني هو حصول قطع في الألياف في بعض مناطق التقوية.

العتبات المغلفة بألياف الكربون فشلت بالقص أي إنها أعطت تقوية إضافية لمنطقة الانثناء مقارنة بألياف الزجاج، ولذلك اعتبر الباحثان الألياف الكربونية أفضل من الألياف الزجاجية في مجال إعادة التأهيل .

أجرى الباحثان [39] [Abdel Hamid & Elshafie 2004] دراسة حول استخدام صفائح الألياف الزجاجية في إعادة تأهيل عتبات خرسانية متضررة، وأجريت هذه الدراسة على ست عتبات بطول 2300mm، وبأبعاد مقطع (300×150)mm مصممة على أن يكون الفشل فيها نتيجة الانثناء، واحدة من هذه العتبات (B1) أخذت أنموذجاً للسيطرة وذلك بتسليط الحمل عليها حتى الفشل، أما بقية العتبات (B2-B6) فتم تحميلها إلى حد 67% من حمل الفشل لعتبة السيطرة (B1) فقد ظهرت الشقوق والتصدعات في الثلث الوسطي من العتبة بسبب تركيز العزم الأقصى، من ثم رفع الحمل وأعيد تأهيل العتبات عن طريق تغليفها خارجياً بصفائح الألياف الزجاجية بسمك 0.08mm وبأشكال مختلفة

وأعيد فحصها تحت أربعة أحمال متركزة واستنتج الباحثان بأن العتبات التي أعيد معالجتها ازداد فيها حمل الفشل بنسبة 8% للعتبة (B2)، و23% للعتبة (B3)، و31% للعتبة (B4)، و34% للعتبة (B5)، و60% للعتبة (B6) مقارنة بحمل الفشل لأنموذج السيطرة (B1)،

كذلك لوحظ بأن الزيادة الحاصلة في حمل الفشل للعتبة (B6) هو أكثر من بقية العتبات، والسبب في ذلك أن هذه العتبة غلفت بالكامل (من الأسفل والجوانب). استنتجوا كذلك حدوث الفشل في العتبة المعاد تأهيلها بتمزق الألياف، وكذلك ازدياد قوة التحمل وجساءة العتبة وتقل مطيلتها بزيادة كمية الألياف المستخدمة في إعادة التأهيل.

قام [40] [Magureanu et al.2007] بدراسة مقاومة الانثناء للعتبات المعاد تأهيلها باستخدام ألياف الكربون في مجموعتين من العتبات المختلفة بالأبعاد وشكل التغليف. في المجموعة الأولى قام الباحثون بصب عتبتين خرسانيتين مسلحتين، وذات طول (550mm)، ومقطع مربع بأبعاد (100*100)mm، بعد ذلك قام الباحثون بفحص إحدى العتبتين كعتبة سيطرة غير مغلفة بألياف الكربون إلى حد الفشل

والعزم الناتج من الفشل رمز له بـ (M^i_r). أما الأنموذج الثاني فقد

تم تسليط حمل عليه إلى حد (M^i_r)، ولقد شوهد بعد هذا الحمل شقوق احدهما بعرض (0.2mm) والثاني كان مانلاً بعرض (0.1mm)، بعد ذلك تم تغليف الأنموذج من الأسفل بطبقة واحدة من الأسفل أما المجموعة الثانية فقد قام الباحثون بصب عتبة خرسانية مسلحة ذات طول (3200mm)، ومقطع مستطيل بارتفاع (250mm)، وعرض (125mm). بعد تسليط حمل الفشل تم إعادة التأهيل للأنموذج بالألياف الكربون، فقد تم تغليف الأنموذج من الأسفل، وكذلك غلف من جميع الجهات في منطقة ال (600mm) الوسط، ومن خلال فحص الأنموذج قبل إعادة التأهيل كان الأود للعتبة في المنتصف عند الفشل (54mm)، وبعد إعادة التأهيل وجد أن سلوك العتبة كان خطياً إلى حد (95%) من أعلى حمل تتحملة العتبة وبصورة عامة استنتج الباحثون أن التغليف بألياف الكربون للعتبات المعاد تأهيلها أعطت نتائج جيدة في مقاومة الانثناء، فقد زادت من قدرة العتبة الخرسانية لتحمل الأحمال المسلطة عليها.

قام الباحثان [41] [Mohammed and Muhaidin 2010] بدراسة دور التغليف الخارجي بشرائط الألياف الكربونية في مجال إعادة التأهيل، ومعالجة العتبات المتضررة والفاشلة في مقاومة القص. وقد قاما بصب ست عتبات خرسانية مسلحة بحيث تتجنب الفشل في مقاومة الانثناء إذ أن اثنتين منها ترك فيها فضاء القص بدون حديد تسليح القص وتغليف خارجي وتسليح داخلي بشرائط الألياف، والعتبات الأربعة المتبقية سلح فيها فضاء القص داخلياً من كل جهة للعتبة بثلاث حلقات من حديد التسليح للقص بقطر 10mm وبمسافة 75mm بين مركز قضبان الحلقات، اثنتان من هذه العتبات تميل فيها الحلقات بزواوية (90°) في حين تميل الحلقات بزواوية (45°) في عتبتين أخريين. وبعد فحص جميع العتبات تم إعادة تأهيلها ومعالجتها بتغليفها خارجياً من الأسفل والجوانب أي على شكل حرف (U) بطبقة واحدة من شرائط

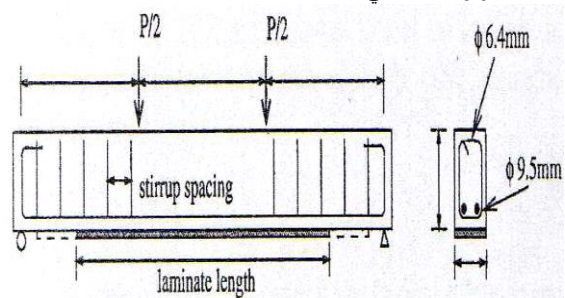
نسبة زيادة التحمل هي (17-33-40)% حسب طول التغليف بالمقارنة مع عتب السيطرة

6- سلوك العتبات الخرسانية المتضررة المعاد تأهيلها باستخدام ألياف البوليمر

من أهداف الدراسة التي قام بها [37] [Grace et al.2003] معرفة تأثير التغليف بألياف البوليمر في إعادة التأهيل، ومعالجة العتبات الخرسانية المتضررة، فأجرى الباحثين دراستهم على (14) عتبة خرسانية مستطيلة المقطع بعرض 152mm وبارتفاع 292mm، وطول 2740mm، وسلحت بحديد تسليح بحيث يتجنب فيها فشل الانثناء، اثنتان من هذه العتبات عدت نماذج للسيطرة فقد فحصت بتسليط قوة متركزة في منتصف العتبة حتى الفشل، أما بقية العتبات فقد فحصت أيضاً بقوة متركزة إلى حد 85% من حمل الفشل لنماذج السيطرة، إذ ظهرت أثناءها شقوق القص على جوانب العتبة ومن ثم رفع الحمل وتمت معالجتها بتغليفها خارجياً بألياف البوليمر الكربونية (CFRP) وأعيد فحص هذه العتبات بعد تغليفها خارجياً وبأشكال مختلفة. واستنتج الباحثون إن التغليف الخارجي يزيد من حمل الفشل للعتبات المتضررة، المعاد تأهيلها ولوحظ أيضاً إن العتبات المغلفة من الأسفل والجوانب أي على شكل (U) تعطي زيادة في حمل الفشل وتقل من الأود في العتبات أكثر من بقية الأشكال المعتمدة في التغليف، ويعتقد الباحثون أنه لو كان التغليف بصفيحتين من ألياف الكربون متعامدتين على بعضهما البعض مع التثبيت الجيد بالايوكسي على سطح الخرسانة يعطي أفضل النتائج من حيث حمل الفشل والأود في العتبة ويعد الشكل الأمثل في عملية التغليف .

قام الباحثان [Buyukozturk and Hearing

[38] [2004] بدراسة تهدف إلى معرفة دور ألياف البوليمر في معالجة العتبات المتضررة شكل (11)، وأجريت هذه الدراسة على خمس عتبات خرسانية بطول 900mm مصممة ليكون الفشل فيها فشل الانثناء، واحدة من هذه العتبات سلط عليها حمل لغاية الفشل، وبذلك عدت أنموذج السيطرة (B1)، أما بقية العتبات فسلط عليها حمل تحت أربعة أحمال متركزة وبإسناد بسيط إلى حد الأود الأقصى والمساوي (L/240) فقد ظهرت أثناءها الشقوق والتصدعات في منطقة الانثناء من الأسفل، ثم رفع الحمل وتمت معالجة العتبات بوضع طبقة من ألياف الكربون بعرض 76mm وطول 700mm في أسفل العتبتين (B3,B2)، أما العتبتان (B5,B4) فتمت معالجتها من الأسفل بألياف الزجاج وبنفس الأبعاد، ومن ثم أعيد فحص النماذج بعد مرور سبعة أيام من المعالجة ولوحظ ما يأتي:-



الشكل (11): أبعاد وتفاصيل التسليح الداخلي والتغليف الخارجي للعتبات [37].

إن العتبتين (B3,B2) اللتين تمت معالجتهما بألياف الكربون حدث الفشل فيهما بالقص مع انفصال طبقة الكربون عن سطح الخرسانة وبحمل فشل أكثر من أنموذج السيطرة (B1) بمقدار 38%، أما فشل العتبتان (B4,B5) المغلفتان بألياف الزجاج كان نتيجة الانثناء مع تمزق الألياف الزجاجية أسفل العتبة، وكانت نسبة الزيادة في حمل الفشل مقارنة بأنموذج السيطرة (B1) 23%، وبالرغم من أن العتبات كانت مصممة على أن تفشل بالانثناء لاحظ الباحثان إن

أقل من حمل الفشل، النماذج تمثل مفاصل الربط بين الأعمدة والجسور حيث كانت أبعاد الأعمدة والجسور متساوية (250*350mm) حيث تمت التقوية في مناطق الربط واثبتت الألياف فعاليتها في إعادة التأهيل قام [43] [Kumar P. et al. 2020] باستخدام (5) نماذج خرسانية بطول (2m) وأبعاد (150*250mm) وتم تسليط أحمال وقيل حدوث الفشل تم تقوية النماذج بالألياف البوليمر الكربونية وباستخدام الأيبوكسي كمادة رابطة وتم تسليط الأحمال لحد الفشل واثبتت النتائج المختبرية زيادة في تحمل الاعتاب المعاد تأهيلها.

7-الاستنتاجات

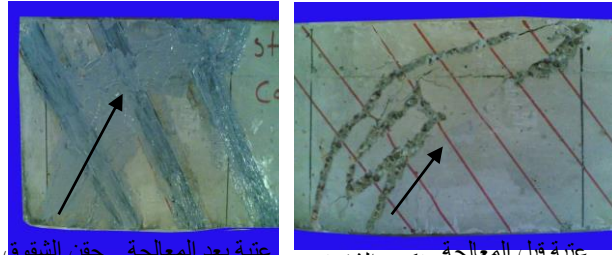
من خلال البحث الحالي والذي يمثل مراجعة لاهمية الياق الكربون في تقوية وإعادة تأهيل الاعضاء الانشائية يمكن استنتاج مايلي:-

- 1-التقوية بالألياف الكربون أدت الى تحسين الاداء في مقاومة الانثناء وحصول زيادة في حمل الفشل للاعضاء الانشائية.
- 2-زيادة في تحمل قوى القص للاعضاء الخرسانية المقواه بالياق البوليمر الكربونية.
- 3-العمل على تقليل الالود بالإضافة الى تقليل الانزلاق في الاعتاب المركبة والحاصل بين الجزء الخرساني والمقطع الحديدي.
- 4- اثبتت الياق الكربون فعاليتها في إعادة تأهيل الاعضاء الخرسانية سواء للانثناء او للقص.
- 5-لألياف الكربون القابلة على زيادة المطيلية بالإضافة الى تحمل الظروف الجوية.
- 6- إجراء المزيد من البحوث لمعرفة تأثير اضافة الياق الكربون للأعضاء الانشائية المعرضة للأحمال الحركية (الزلازل).بالإضافة الى دراسة تأثير أضافة الياق الكربون للمناطق المعرضة لعزوم اللإلتواء.

8-REFERENCE

- [1] N.A. Ragab, "Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Various Advanced Composite Matirals" M.Sc., Thesis, University of Calgargy, Alberta, 2007.
- [2] D. Duthinh, and M. Starnes, "Strength and Ductility of Concrete Beams Reinforced with Carbon FRP and Steel", National Institute of Standards and Technology, Nistir 6830, pp.1-16, 2001.
- [3] M. Tavakkolizadeh, H. Saadatmanesh, "Strengthening of Steel-Concrete Composite Girder Using Carbon Fiber Reinforced Polymers Sheets", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, No.1, January 1, pp.30-40, 2003.
- [4] J.G. Teng, J.F. Chen, S.T. Smith, and L. Lam, "FRP Strengthened RC Structures", John Wiley & Sons, Ltd, England, 2002.
- [5] E. Fitzer, J.L. Figuciredo, C.A. Bernard, R.T.K. Baker, and K.J. Huttlinger, "In Carbon Fibers Filaments and Composites", Kluwor Academic, Dordrecht, pp3-41, 2000.
- [6] A. Carolin, "Carbon Fiber Reinforced Polymers for Stregthening of Structural Elements" Ph.D. Thesis, University of Lulea, Sweden, pp.194, 2003.
- [7] M. Lu and Q. Shi, "The Bend Stiffness of Crane Beam Strengthened with CFRP under Monotonic and Fatigue Load Condition", International Journal of Nonlinear Science, Vol. 4, pp. 44-51, 2007.
- [8] A.L. Gamino and T.N. Bittencourt, "Reinforced Concrete Beams Strengthened With CFRP: Experimental Analytical and Numerical Approaches", FRPRCS-8, University of Patras, Greece, Vol.3, No.2, pp.1-9, July 2007.
- [9] R.Y. Joseph, S.P. Gross, D.W. Dinehart, and J.J. Mildenberg, "Flexural Behavior of Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted CFRP Strips", ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 4, pp. 44-51, 2007.
- [10] Q.F. Hassan, "Behavior of CFRP Strengthened Reinforcement Concrete Beams Under Cyclic Loading", Doctoral Thesis Department of Civil Engineering, Nahrain University, Baghdad, Iraq, pp.180, 2007.
- [11] K. Fawzy, H. M. Hassan, and M. Madqour "Experimental and analytical investigations of reinforced concrete beams strengthened by different CFRP sheet schemes", Frattura ed Integrità Strutturale Journal, Vol.56, Issue:10, 2021.
- [12] M.A. Mashrei, and A. Sultan, "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets with Grooves", Latin American Solids and Structures Journal, Vol.16, Issue:4, 2019.
- [13] M. AL-Sefy, M. EL-Kateb, T. Elafandy and A.A. Abdelrahman, "Strengthening of RC continuous Slabs Using Externally Bonded Prestressed CFRP Laminates", Civil Engineering Research Magazine, Vol.38 Issue:1, 2016.
- [14] N.F. Grace, A.K. Soliman, G. Abdel-Sayed, and K.R. Saleh, "Behavior and ductility of simple and continuous FRP reinforced beams", Journal of composites for construction, Vol. 2, No. 4, pp.186-194, 1998.
- [15] A. Li, J. Assih and Y. Delmas, "Shear strengthening of RC beams with externally bonded CFRP sheets", Journal of structural engineering, Vol. 127, No. 4, pp. 374- 380, 2001.
- [16] C. Deniaud and J.J.R. Cheng, "Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets", ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 3, pp.386-494, 2001.

الياق الكربون وبزوايا (90-45) نسبة للمحور الطولي للعتبة وبعد المعالجة تم فحص جميع العتبات، واستنتج الباحثان من النتائج المستحصلة قبل المعالجة وبعدها أن التغليف الخارجي بشرائط ألياف الكربون أسهم بشكل كبير في إعادة تأهيل العتبات المتضررة من خلال زيادة حمل الفشل فيها مقارنة بحمل الفشل للعتبات نفسها قبل إعادة التأهيل، واستنتج الباحثين بان التغليف الخارجي بزواوية (45°) يعطي زيادة أكثر في حمل الفشل من التغليف بزواوية (90°)، وعل الباحثان ذلك بان شقوق القص التي تتولد أثناء الفشل تكون عمودية على شرائط الألياف، وبذلك تتعرض هذه الشرائط إلى قوى قص حقيقية والشكل التالي يوضح عتبة قبل وبعد إعادة التأهيل.



الشكل (12): العتبة قبل المعالجة وبعدها عن طريق التغليف الخارجي بشرائط من ألياف الكربون [41].

قام [42] [Golias E. et al. 2020] باستخدام ألياف البوليمر الكربونية في إعادة تأهيل (6) نماذج خرسانية بعد تسليط عليها أحمال

- [17] C. Pellegrino and C. Modena, "Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement", *Journal of composite for construction*, Vol. 6, No.2, pp.104-111, 2002.
- [18] O. Buyukozturk, O. Gunes, E. Karaca, "Characterization and modeling of debonding in RC beams strengthening with FRP composites", 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, pp.1-8, 2002.
- [19] F. Micelli, R. Annaiah and A. Nanni, "Strengthening of short shear span reinforced concrete T joists with Fiber-Reinforced plastic composites", *Journal of composite for construction*, 6, No. 4, pp.264-271, 2002.
- [20] A. M.L., "Shear Behavior of RC Beams Strengthened By CFRP Strips", *Journal of applied Engineering Science*, Vol.8 Issue:1, pp.250-258, 2021.
- [21] H.H. Mahhana, R.A., Hawileh and J.A. Abdullah, "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP Wraps", *Procedia Structural Integrity Journal*, Vol.17, pp214–221, 2019.
- [22] Y. Murad, "The Influence of CFRP Orientation Angle on the Shear Strength of RC Beams", *The Open Construction and Building Technology Journal*, Vol.12, pp 269-281, 2018.
- [23] A.A.S. Shaat, "Structural Behavior of Steel Columns and Steel-Concrete Composite Girders Retrofitted Using CFRP", Ph.D Dissertation, Queen University, 2007.
- [24] H.E.M. Sllam., A.A.M. Badawy, A.M. Saba, "Flexure Behavior of Strengthened Steel-Concrete Composite Beams By Various Plating Methods", *Journal of Construction Steel Research*, pp. 1081-1087, 2009.
- [25] A. F. Kadhum, "Structural Behavior for Short Span Composite Beams Strengthened By CFRP Sheets", Ph.D.Thesis, University of Technology, Iraq, 2009.
- [26] B.J. Al-Sulayfani and I.A. Aziz, "Behavior of Composite Beams(Steel-Concrete) Strengthened BY CFRP Sheets Under Repeated Loading", *AL-Rafdain Engineering Journal*, Vol.21 Issue:2, pp.12-26, 2013.
- [27] M.S. Mosavi and S.A. Nik., "Strength of (Steel-Concrete) Composite Girder Using CFRP Plates", *Indian Academy of Sciences*, Vol.40 Issue:1, pp.249-261, 2015.
- [28] M. Subhani, R. AL-Ameri and M. I. Kabir, "Strengthening of steel-concrete composite beams with composite slab", *Steel and Composite Structures Journal*, Vol. 34, No. 1, pp 91-105, 2020.
- [29] M. H. Makhlof, "Strengthening of Composite Steel-Concrete Beams Openings by Adopting Different Reinforcement Methods", *Advances in Research Journal*, Vol. 19, No. 2, pp 1-17, 2019.
- [30] K. Normashiri, M. Jumaat, and N.h. Sulong, "Investigation on end anchoring of CFRP Strengthened Steel I-beams", *International Journal of the Physical Sciences*, Vol.5(9), pp.1360-1371, 2010.
- [31] B.M. Phares, T.J. Wipf, F.W. Klaiber, Abu-A. Hawash, and Y. Lee, "Strengthening of Steel Girder Bridges Using FRP", *Proceed of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa, www.iowadot.gov, August 2003.
- [32] K. Normashiri, M. Jumaat, and N.h. Sulong, "Shear Strengthening of Steel I-beam by Using CFRP Strips", *Scientific Research and Essays*, Vol.5(16), pp.2155-2168, 2010.
- [33] S.A. AL-Ridha, F.A. Atshan, S.K. Mahmoud and K.Q. Hameed, "Effect of Strengthening of Steel Beams with Variable length by using carbon fiber", *Journal of Engineering*, Vol.2019.
- [34] V.P. Faikha, N. Ramesh, S. Shilpa, S. Nassar and A.A. Kunju, "Flexural Strengthening of steel beams using CFRP sheets", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol.6 Issue:5, 2019.
- [35] G.M. EL-Mahdy, "Strengthening of Corroded Steel Structures Using CFRP", *Housing and building National Research Center*, 2019.
- [36] P.R. Jagtab, and S.M. Pore, "Shear Strengthening Of Steel I-Beam With Cfrp Composites", *International Journal of Scientific & Technology Research*, Vol. 9, ISSUE 2, 2020.
- [37] N.F. Grace, G.A. Sayed, A.K. Soliman, and K.R. Saleh, "Strengthening reinforced concrete beams using fiber Reinforced polymer (FRP) laminate" *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 5, pp. 865-874, 2003.
- [38] O. Buyukozturk, and B. Hearing, "Failure behavior of Precracked concrete beams retrofitted with FRP", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 13.No. 4, pp. 138-144, 2004.
- [39] A. Abdel Hamid and H. Elshafie, "Retrofitting of reinforced Concrete beams using advanced composite overlayers" *cement And Concrete Composites*, Vol. 19, No. 8, pp.18-29, 2004.
- [40] C. Magureanu, B. Heghes and A. Chiorean, "Strengthening with Carbon Fibers Experimental Study", *FRPRCS-8*, University of Patras, Greece, Vol. 3, No. 13, pp.1-6, 2007.
- [41] B.J. Mohammed and B.A. Muhaidin, "Effect of Externally Bonded strips of Polymer Fiber on the Shear Strength of RC Beam", *Kirkuk University Journal*, Vol.5 Issue:1, 2010.
- [42] E. Golia, G. Adnantis, S. Danai, and K. Chris, "Application of X-Shaped CFRP Ropes for Structural Upgrading of Reinforced Concrete Beam-Column Joints under Cyclic Loading-Experimental Study", <https://www.mdpi.com/journal/fibers>.
- [43] P. Kumar, S. Bishnoi, and B. Bhattach, "Influence of CFRP Strand Sheet on Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beam", *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 18, pp778-793, 2020.

Strengthening and Rehabilitating Structural Members by Carbon Fiber Reinforced Polymers (A Review)

Islam Abdullah Aziz

Khalaf Ibrahim Mohammed

islamabd@uomosul.edu.iq

kimjebouri@uomosul.edu.iq

Civil Engineering Department, Collage of Engineering, University of Mosul

ABSTRACT

The use of Carbon Fiber Reinforced Polymers CFRP in strengthening and rehabilitating structural members is one of the modern techniques which proved to be effective in different civil engineering applications. This review aims to provide the researchers and construction specialists with a detailed description on the practical application of External or Internal Carbon Fiber Reinforced Polymers in strengthening and rehabilitating concrete, steel, and composite members in flexure and shear

Keyword

Carbon Fiber; flexure; shear; concrete beams; composite beams.