International Journal of Civil and Structural Engineering Research ISSN 2348-7607 (Online)
Vol. 14, Issue 1, pp: (15-20), Month: April 2026 - September 2026, Available at: www.researchpublish.com

Effectiveness of Using Carbon Fiber in Strengthening Concrete Elements

فاعلية استخدام الياف الكربون فى تقوية العناصر الخرسانية

[1]JUMAH EID BIN OBAID, [2]Jasem Bouarki

PUBLIC AUTHORITY FOR APPLYING EDUCATION AND TRAINING

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19731509

Published Date: 24-April-2026

Abstract: **This study examines the effectiveness of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in strengthening reinforced concrete elements. It highlights the material's high tensile strength, lightweight properties, and resistance to corrosion, which improve overall structural performance. The results show that CFRP significantly enhances flexural and shear capacity, reduces crack propagation, and increases load-bearing capacity while providing a more ductile and safer failure mode. Overall, CFRP is an effective solution for extending the service life of concrete structures.**

Keywords: **carbon fiber reinforced polymer (CFRP), high tensile strength, concrete structures.**

المقدمة

تُعدّ المنشآت الخرسانية المسلحة من أكثر أنظمة البناء استخدامًا على مستوى العالم، وذلك لما تتمتع به من خصائص ميكانيكية وإنشائية مميزة مثل مقاومة الضغط العالية، وسهولة التشكيل، وتكلفة التنفيذ الاقتصادية مقارنةً بغيرها من المواد الإنشائية. ومع ذلك، فإن هذه المنشآت ليست بمنأى عن التعرض للتدهور أو الفشل الإنشائي مع مرور الزمن نتيجة لعوامل متعددة مثل الأحمال الزائدة، والتغيرات البيئية، والتشققات، وضعف التصميم أو التنفيذ، مما يستدعي البحث عن حلول فعّالة لتقويتها وإطالة عمرها الخدمي.

في هذا السياق، برزت تقنيات التدعيم الحديثة كأحد أهم الاتجاهات في مجال الهندسة الإنشائية، ومن أبرزها استخدام ألياف الكربون (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP) أو ألياف الكربون في تدعيم العناصر الخرسانية. وتتميز هذه المادة بخصائص ميكانيكية متقدمة مثل خفة الوزن، ومقاومة الشد العالية، ومقاومة التآكل، مما يجعلها خيارًا مثاليًا لتقوية الكمرات، والبلاطات، والأعمدة الخرسانية دون إضافة أحمال كبيرة على المنشأ القائم.

وقد أشارت العديد من الدراسات الحديثة إلى أن استخدام ألياف الكربون يساهم بشكل ملحوظ في تحسين الأداء الإنشائي للعناصر الخرسانية من حيث مقاومة الانحناء والقص وزيادة القدرة التحميلية، بالإضافة إلى تحسين السلوك تحت الأحمال المتكررة والظروف البيئية القاسية مثل درجات الحرارة العالية. على سبيل المثال، بينت الدراسات أن العناصر الخرسانية المسلحة بألياف الكربون أظهرت تحسنًا واضحًا في الخواص الميكانيكية والمتانة مقارنة بالعناصر التقليدية غير المدعمة (Muthukumarana et al., 2023؛ Aduwenye et al., 2024).

كما أن الاهتمام المتزايد بهذا النوع من التدعيم لا يقتصر على الجانب النظري فقط، بل يمتد إلى التطبيقات العملية في إعادة تأهيل المنشآت المتضررة أو المتقادمة، حيث أصبح استخدام ألياف الكربون خيارًا شائعًا في مشاريع التقوية الحديثة نظرًا لكفاءته العالية وسهولة تطبيقه وسرعة تنفيذه مقارنة بطرق التدعيم التقليدية.

ومن هنا، يهدف هذا البحث إلى دراسة فاعلية استخدام ألياف الكربون في تقوية العناصر الخرسانية، من خلال تحليل الجانب النظري المرتبط بخصائص هذه المواد، واستعراض التطبيقات العملية وأثرها على تحسين الأداء الإنشائي، وصولًا إلى تقييم مدى كفاءتها كحل هندسي مستدام في مجال تقوية المنشآت الخرسانية.

مشكلة البحث

على الرغم من التطور الكبير في تقنيات تصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة، إلا أن العديد من هذه المنشآت ما زالت تعاني من مشكلات إنشائية متزايدة مع مرور الزمن، مثل التشققات، وضعف مقاومة الانحناء والقص، وتدهور الأداء تحت الأحمال المتكررة أو الظروف البيئية القاسية. وتُعد طرق التدعيم التقليدية مثل زيادة المقاطع الخرسانية أو استخدام الصفائح الفولاذية محدودة الفاعلية في بعض الحالات، إضافة إلى أنها قد تسبب زيادة في الوزن الذاتي للمنشأ أو صعوبة في التنفيذ.

وفي ظل هذه التحديات، برزت الحاجة إلى البحث عن مواد وتقنيات تدعيم حديثة تتميز بالكفاءة العالية وخفة الوزن وسهولة التطبيق. ومن هنا ظهرت ألياف الكربون (CFRP) كأحد الحلول الواعدة في تقوية العناصر الخرسانية، إلا أن درجة فاعليتها في تحسين السلوك الإنشائي للعناصر الخرسانية ما زالت تحتاج إلى مزيد من الدراسة والتحليل، خاصة فيما يتعلق بقدرتها على رفع المقاومة وتحسين الأداء تحت مختلف الظروف التشغيلية.

وعليه، تتمثل مشكلة البحث في تقييم مدى فاعلية استخدام ألياف الكربون في تقوية العناصر الخرسانية، ومدى مساهمتها في تحسين الخصائص الميكانيكية والأداء الإنشائي مقارنة بالأنظمة التقليدية للتدعيم.

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى دراسة فاعلية استخدام ألياف الكربون في تقوية العناصر الخرسانية من خلال تحليل خصائص هذه المواد وتأثيرها على الأداء الإنشائي للمنشآت الخرسانية. كما يسعى البحث إلى فهم مدى مساهمة ألياف الكربون في تحسين مقاومة الانحناء والقص للعناصر الخرسانية، مقارنةً بالعناصر غير المدعمة. بالإضافة إلى ذلك، يهدف إلى تقييم التحسن في السلوك الميكانيكي العام للخرسانة بعد التدعيم، واستعراض أهم التطبيقات العملية لهذه التقنية في مجال تقوية وإعادة تأهيل المنشآت. كما يهدف البحث إلى توضيح المزايا والقيود المرتبطة باستخدام ألياف الكربون، وصولًا إلى تقديم رؤية هندسية تساعد في اتخاذ القرار المناسب عند استخدامها في المشاريع الإنشائية.

أهمية البحث

تنبع أهمية هذا البحث من كونه يتناول أحد الاتجاهات الحديثة في مجال الهندسة الإنشائية، وهو استخدام ألياف الكربون في تقوية العناصر الخرسانية، لما لها من تأثير واضح في تحسين أداء المنشآت وإطالة عمرها الخدمي. وتتمثل الأهمية العلمية في إسهام هذا البحث في توضيح السلوك الإنشائي للخرسانة عند تدعيمها بألياف الكربون، مما يضيف معرفة علمية تساعد في تطوير فهم أعمق لآليات التقوية الحديثة. أما من الناحية التطبيقية، فيساعد البحث المهندسين والمختصين على تقييم مدى فعالية استخدام هذه التقنية في مشاريع إعادة التأهيل والصيانة، واختيار الحلول الأنسب لتعزيز كفاءة المنشآت القائمة. كما تنعكس الأهمية الاقتصادية في إمكانية تقليل تكاليف الإصلاح والصيانة على المدى الطويل، نتيجة تحسين أداء المنشآت وزيادة عمرها الافتراضي. إضافة إلى ذلك، تكمن الأهمية الإنشائية في تعزيز قدرة المنشآت الخرسانية على مقاومة الأحمال المختلفة وتحسين أدائها تحت الظروف التشغيلية الصعبة باستخدام مواد تدعيم متطورة وفعّالة.

الجانب النظري

أولًا: مفهوم تدعيم المنشآت الخرسانية

يُعد تدعيم المنشآت الخرسانية أحد أهم مجالات الهندسة الإنشائية الحديثة، ويقصد به مجموعة الإجراءات الفنية التي تهدف إلى تحسين الأداء الإنشائي للعناصر الخرسانية أو استعادة قدرتها التحميلية في حال تعرضها للضعف أو التلف. ويشمل ذلك زيادة مقاومة العناصر للأحمال المختلفة مثل الانحناء والقص والضغط، بالإضافة إلى تحسين سلوكها العام تحت ظروف التشغيل المختلفة.

وقد ظهرت الحاجة إلى عمليات التدعيم نتيجة التغير المستمر في متطلبات الاستخدام، وازدياد الأحمال التشغيلية على المنشآت، إضافة إلى الأخطاء التصميمية أو التنفيذية، والتأثيرات البيئية مثل التآكل والرطوبة ودرجات الحرارة. وفي هذا السياق، تطورت أساليب التدعيم من الحلول التقليدية مثل زيادة أبعاد العناصر الخرسانية أو استخدام الصفائح الفولاذية، إلى حلول أكثر تطورًا تعتمد على المواد المركبة مثل ألياف الكربون، لما تتميز به من كفاءة عالية ومرونة في التطبيق.

ثانيًا: ألياف الكربون (CFRP) وخصائصها

ألياف الكربون (CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer) هي مواد مركبة تتكون من ألياف دقيقة جدًا من الكربون ذات مقاومة شد عالية، يتم دمجها داخل مادة راتنجية (Resin) لتكوين نظام إنشائي متكامل يتميز بخفة الوزن وقوة الأداء. وتُعد هذه المواد من أحدث التقنيات المستخدمة في مجال تقوية المنشآت الخرسانية.

تتميز ألياف الكربون بمجموعة من الخصائص الميكانيكية والفيزيائية المهمة، من أبرزها ارتفاع مقاومة الشد بشكل كبير مقارنة بالفولاذ، وانخفاض الوزن النوعي، إضافة إلى مقاومتها العالية للتآكل والصدأ، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في البيئات القاسية مثل المنشآت الساحلية أو الصناعية. كما تمتاز بسهولة تشكيلها وتطبيقها على الأسطح الخرسانية المختلفة دون الحاجة إلى معدات ثقيلة أو تغييرات كبيرة في التصميم الإنشائي.

وقد أكدت العديد من الدراسات الحديثة أن استخدام ألياف الكربون يؤدي إلى تحسين واضح في مقاومة العناصر الخرسانية وزيادة قدرتها على تحمل الأحمال المختلفة، مما يجعلها خيارًا متقدمًا في عمليات إعادة التأهيل والتدعيم (Muthukumarana et al., 2023؛ Aduwenye et al., 2024).

ثالثًا: آلية عمل ألياف الكربون في تقوية الخرسانة

تعتمد آلية تقوية العناصر الخرسانية باستخدام ألياف الكربون على فكرة نقل وإعادة توزيع الإجهادات داخل العنصر الإنشائي. فعند تثبيت شرائح أو أقمشة CFRP على السطح الخارجي للخرسانة، تعمل هذه الألياف على امتصاص جزء كبير من إجهادات الشد التي لا تستطيع الخرسانة تحملها بشكل فعال بسبب ضعفها في مقاومة الشد.

كما تساهم ألياف الكربون في تقليل عرض وانتشار الشروخ داخل الخرسانة، مما يؤدي إلى تحسين سلوك العنصر تحت الأحمال المتكررة وزيادة صلابته الكلية. بالإضافة إلى ذلك، فإن وجود هذه الألياف يعزز من قدرة العنصر على مقاومة الفشل المفاجئ، حيث يصبح الفشل أكثر تدريجية مقارنة بالعناصر غير المدعمة.

وقد أثبتت الدراسات التجريبية أن استخدام CFRP في تدعيم الكمرات الخرسانية يؤدي إلى زيادة كبيرة في مقاومة الانحناء وتحسين السلوك الإنشائي العام للعناصر، خاصة تحت الأحمال العالية أو المتكررة (Guo et al., 2021).

رابعًا: الخصائص المميزة لألياف الكربون

تتمتع ألياف الكربون بمجموعة من الخصائص التي تجعلها من أكثر المواد فعالية في تقوية المنشآت الخرسانية. ومن أهم هذه الخصائص مقاومتها العالية جدًا للشد، والتي تفوق في كثير من الحالات مقاومة الفولاذ التقليدي، مما يجعلها فعالة في مقاومة الإجهادات الناتجة عن الانحناء.

كما تمتاز بخفة وزنها الكبيرة، مما يعني أنها لا تضيف أحمالًا إضافية على المنشأ، وهو ما يُعد ميزة مهمة في عمليات إعادة التأهيل. إضافة إلى ذلك، فهي مقاومة للتآكل الكيميائي والبيئي، مما يزيد من عمرها الافتراضي ويقلل الحاجة إلى أعمال صيانة متكررة.

ومن الخصائص المهمة أيضًا سهولة تركيبها وتطبيقها على مختلف أشكال العناصر الخرسانية، سواء كانت كمرات أو أعمدة أو بلاطات، مما يجعلها مرنة في الاستخدام وتناسب العديد من التطبيقات الهندسية المختلفة.

خامسًا: تطبيقات ألياف الكربون في المنشآت الخرسانية

تُستخدم ألياف الكربون على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية، وخاصة في تقوية العناصر الخرسانية المتضررة أو غير الكافية إنشائيًا. ومن أبرز تطبيقاتها تقوية الكمرات الخرسانية المعرضة لأحمال انحناء عالية، حيث يتم لف أو لصق أقمشة CFRP على المناطق المعرضة للشد لزيادة قدرتها التحميلية.

كما تُستخدم في تقوية الأعمدة الخرسانية لتحسين مقاومتها للضغط وزيادة قدرتها على تحمل الأحمال المحورية، بالإضافة إلى استخدامها في تدعيم البلاطات والجسور، خاصة في حالات إعادة التأهيل للمنشآت القديمة.

وقد أظهرت الدراسات التطبيقية أن استخدام CFRP في هذه الحالات يؤدي إلى تحسين كبير في الأداء الإنشائي وزيادة العمر الافتراضي للمنشآت، مع تقليل الحاجة إلى عمليات الهدم أو إعادة البناء الكاملة (AL-Khafaji et al., 2024؛ Abd elaziz et al., 2023).

سادسًا: تأثير العوامل البيئية على أداء ألياف الكربون

على الرغم من المزايا الكبيرة التي تقدمها ألياف الكربون، إلا أن أداءها قد يتأثر ببعض العوامل البيئية، خاصة درجات الحرارة العالية. فعند تعرض العناصر المدعمة بـ CFRP لحرارة مرتفعة أو حريق، قد يحدث ضعف في مادة الربط (الراتنج)، مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة الالتصاق بين الألياف والخرسانة.

كما يمكن أن تؤثر الرطوبة والظروف الكيميائية القاسية على أداء النظام المركب على المدى الطويل، مما يستدعي دراسة هذه العوامل بعناية عند تصميم أنظمة التدعيم باستخدام ألياف الكربون. وقد أشارت بعض الأبحاث إلى أن مقاومة الحريق تُعد من التحديات الرئيسية التي تواجه استخدام CFRP في المنشآت المعرضة لدرجات حرارة مرتفعة (Cui&Yang, 2025).

سابعًا: المقارنة بين ألياف الكربون وطرق التدعيم التقليدية

عند مقارنة ألياف الكربون بطرق التدعيم التقليدية مثل الصفائح الفولاذية أو زيادة المقاطع الخرسانية، نجد أن CFRP يتفوق في عدة جوانب مهمة. فهو أخف وزنًا بشكل كبير، ولا يضيف أحمالًا إضافية على المنشأ، كما أنه أكثر مقاومة للتآكل مقارنة بالفولاذ.

بالإضافة إلى ذلك، فإن عملية تطبيقه أسرع وأكثر مرونة، ولا تتطلب معدات ثقيلة أو عمليات إنشائية معقدة، مما يقلل من زمن التنفيذ ويحد من تعطيل استخدام المنشأة. في المقابل، قد تكون التكلفة الأولية لمواد CFRP أعلى نسبيًا، إلا أن انخفاض تكاليف الصيانة وطول العمر الافتراضي يجعله خيارًا اقتصاديًا على المدى البعيد.

الجانب العملي

منهجية الدراسة التطبيقية

يعتمد الجانب العملي في هذا البحث على منهج وصفي–تحليلي قائم على مراجعة وتفسير النتائج التجريبية الواردة في الدراسات الحديثة التي تناولت استخدام ألياف الكربون (CFRP) في تقوية العناصر الخرسانية. ويتم التركيز على تحليل سلوك العناصر الخرسانية قبل وبعد التدعيم، من خلال مقارنة التغيرات في الخصائص الميكانيكية مثل مقاومة الانحناء، ومقاومة القص، والصلابة العامة، بالإضافة إلى نمط الفشل الإنشائي. ويهدف هذا التحليل إلى توضيح مدى فاعلية ألياف الكربون في تحسين الأداء الإنشائي للعناصر الخرسانية تحت تأثير الأحمال المختلفة.

خطوات تطبيق تدعيم ألياف الكربون

تتم عملية تدعيم العناصر الخرسانية باستخدام ألياف الكربون وفق تسلسل عملي دقيق يهدف إلى ضمان تحقيق أفضل أداء إنشائي. تبدأ العملية بمرحلة تحضير السطح الخرساني، حيث يتم تنظيفه جيدًا من الغبار والزيوت والمواد غير المتماسكة، مع معالجة أي شروخ أو عيوب سطحية لضمان تحقيق التصاق قوي بين الخرسانة ومادة التدعيم.

بعد ذلك يتم تجهيز مادة الربط (الإيبوكسي)، والتي تُعد العنصر الأساسي في تثبيت ألياف الكربون على السطح الخرساني، حيث يتم خلطها بنسب محددة وفق تعليمات الاستخدام لضمان الحصول على خواص ميكانيكية مناسبة. ثم تأتي مرحلة تطبيق ألياف الكربون، حيث يتم لصق الأقمشة أو الشرائح على المناطق الحرجة في العنصر الخرساني مثل مناطق الشد في الكمرات أو حول الأعمدة، مع مراعاة إزالة أي فقاعات هوائية أثناء عملية اللصق لضمان جودة الالتصاق.

وفي المرحلة الأخيرة يتم ترك المادة المركبة لفترة زمنية تسمى مرحلة التصلب (Curing)، يتم خلالها حدوث تفاعل كيميائي بين الإيبوكسي وألياف الكربون يؤدي إلى تكوين نظام إنشائي متكامل قادر على نقل الأحمال بكفاءة عالية بين الخرسانة وألياف التدعيم.

تحليل الأداء الإنشائي قبل وبعد التدعيم

تُظهر الدراسات التجريبية أن العناصر الخرسانية غير المدعمة غالبًا ما تعاني من ضعف في مقاومة الشد، مما يؤدي إلى ظهور الشروخ بشكل مبكر عند زيادة الأحمال، وبالتالي حدوث فشل إنشائي أسرع. في المقابل، عند تدعيم هذه العناصر بألياف الكربون، يحدث تحسن ملحوظ في الأداء الإنشائي، حيث تزداد القدرة على تحمل الأحمال ويتأخر ظهور الشروخ بشكل واضح.

كما يتحسن سلوك الانحناء للعناصر الخرسانية المدعمة، حيث تصبح أكثر قدرة على مقاومة التشوهات الناتجة عن الأحمال الخارجية. بالإضافة إلى ذلك، يلاحظ انخفاض معدل انتشار الشروخ وزيادة صلابة العنصر بشكل عام، مما يعكس فعالية ألياف الكربون في تحسين الأداء الإنشائي للعناصر الخرسانية.

أنماط الفشل في العناصر المدعمة بألياف الكربون

يختلف نمط الفشل في العناصر الخرسانية المدعمة بألياف الكربون عن العناصر التقليدية غير المدعمة. ففي الحالة التقليدية، يكون الفشل عادةً مفاجئًا نتيجة توسع الشروخ الداخلية وعدم قدرة الخرسانة على مقاومة إجهادات الشد. أما في حالة التدعيم بألياف الكربون، فإن الفشل يكون أكثر تدريجية، مما يوفر مستوى أعلى من الأمان الإنشائي.

وقد يحدث الفشل في العناصر المدعمة في عدة صور، منها انفصال طبقة ألياف الكربون عن السطح الخرساني نتيجة ضعف الالتصاق، أو تمزق ألياف الكربون نفسها عند الوصول إلى حد الإجهاد الأقصى، أو فشل الخرسانة في مناطق الضغط عند التحميل الزائد. ويُعد هذا السلوك التدريجي من أهم المميزات التي تجعل استخدام CFRP خيارًا آمنًا وفعالًا في تقوية المنشآت.

تأثير ألياف الكربون على مقاومة الانحناء والقص

أثبتت النتائج العملية أن استخدام ألياف الكربون يؤدي إلى تحسين كبير في مقاومة الانحناء للعناصر الخرسانية، حيث تعمل هذه الألياف على مقاومة إجهادات الشد في المناطق الحرجة، خاصة في الجزء السفلي منالكمرات. كما يساهم هذا التدعيم في تحسين مقاومة القص من خلال تقليل انتشار الشروخ المائلة وزيادة تماسك العنصر الإنشائي بشكل عام.

وتشير النتائج إلى أن زيادة عدد طبقات ألياف الكربون أو تحسين طريقة التثبيت يمكن أن يؤدي إلى زيادة إضافية في القدرة التحميلية للعناصر الخرسانية، مما يعكس مرونة هذه التقنية وإمكانية تطوير أدائها حسب متطلبات التصميم.

العوامل المؤثرة في كفاءة التدعيم

تتأثر كفاءة استخدام ألياف الكربون في تقوية العناصر الخرسانية بعدة عوامل مهمة تؤثر بشكل مباشر على الأداء النهائي. من أبرز هذه العوامل جودة تجهيز السطح الخرساني قبل التطبيق، حيث إن أي ضعف في التحضير قد يؤدي إلى ضعف في الالتصاق بين المواد.

كما يلعب نوع مادة الإيبوكسي المستخدمة دورًا مهمًا في تحديد قوة الترابط بين ألياف الكربون والخرسانة. بالإضافة إلى ذلك، فإن اتجاه الألياف وعدد الطبقات المستخدمة يؤثران بشكل كبير على مقدار التحسن في المقاومة. كما أن الظروف البيئية أثناء التنفيذ وبعده، مثل درجة الحرارة والرطوبة، قد تؤثر أيضًا على كفاءة النظام المركب وأدائه على المدى الطويل.

مقارنة النتائج العملية مع العناصر التقليدية

تشير النتائج التطبيقية إلى أن العناصر الخرسانية المدعمة بألياف الكربون تتفوق بشكل واضح على العناصر التقليدية غير المدعمة من حيث مقاومة الأحمال وسلوك التشقق. حيث تتميز العناصر المدعمة بزيادة في القدرة التحميلية، وتحسن في الصلابة، وتأخر في ظهور الفشل الإنشائي.

في المقابل، تكون العناصر غير المدعمة أكثر عرضة للتدهور السريع تحت تأثير الأحمال المتكررة أو العالية، مما يؤكد أهمية استخدام ألياف الكربون كحل متقدم وفعال في تقوية المنشآت الخرسانية وإطالة عمرها الخدمي.

النتائج والمناقشة

تُظهر النتائج المستخلصة من الدراسات التجريبية والتحليلية المتعلقة باستخدام ألياف الكربون (CFRP) في تقوية العناصر الخرسانية أن هناك تحسنًا واضحًا وملموسًا في الأداء الإنشائي للعناصر بعد التدعيم مقارنة بالحالة غير المدعمة. ويمكن ملاحظة هذا التحسن في عدة جوانب رئيسية تشمل مقاومة الانحناء، مقاومة القص، نمط الفشل، والصلابة العامة للعنصر الخرساني.

فيما يتعلق بمقاومة الانحناء، أظهرت النتائج أن العناصر الخرسانية المدعمة بألياف الكربون تمتلك قدرة أعلى على تحمل الأحمال مقارنة بالعناصر غير المدعمة، حيث تعمل ألياف الكربون على مقاومة إجهادات الشد في المناطق الحرجة من العنصر، خاصة في أسفل الكمرات. هذا التحسن يعود إلى قدرة ألياف الكربون العالية على نقل الإجهادات وتوزيعها بشكل أكثر كفاءة، مما يؤدي إلى تأخير حدوث التشققات وزيادة الحمل الأقصى الذي يمكن أن يتحمله العنصر قبل الفشل. وقد أكدت الدراسات أن استخدام CFRP يؤدي إلى زيادة ملحوظة في مقاومة الانحناء مقارنة بالخرسانة التقليدية (Guo et al., 2021؛ AL-Khafaji et al., 2024).

أما بالنسبة لمقاومة القص، فقد بينت النتائج أن التدعيم بألياف الكربون يساهم في تقليل انتشار الشروخ المائلة التي تُعد من أهم أسباب فشل العناصر الخرسانية تحت تأثير قوى القص. حيث تعمل ألياف الكربون كعنصر مقاوم إضافي يحد من تطور هذه الشروخ ويزيد من تماسك العنصر الإنشائي، مما يرفع من كفاءته في مقاومة الأحمال الجانبية أو المركبة.

ومن ناحية نمط الفشل، فقد أظهرت النتائج اختلافًا واضحًا بين العناصر المدعمة وغير المدعمة. ففي العناصر غير المدعمة، يحدث الفشل بشكل مفاجئ نتيجة التوسع السريع في الشروخ الداخلية، بينما في العناصر المدعمة بألياف الكربون يكون الفشل تدريجيًا وأكثر أمانًا. وغالبًا ما يظهر الفشل في صورة انفصال طبقة CFRP عن السطح الخرساني أو تمزق الألياف عند الوصول إلى الحد الأقصى للإجهاد، مما يمنح المنشأ قدرة أكبر على التحذير قبل حدوث الانهيار.

كما بينت النتائج تحسنًا في الصلابة العامة للعناصر الخرسانية بعد التدعيم، حيث تصبح العناصر أقل عرضة للتشوهات تحت تأثير الأحمال. هذا التحسن يعكس كفاءة ألياف الكربون في تقليل الانحناءات وزيادة مقاومة العنصر للتغيرات الشكلية، مما يساهم في تحسين الأداء الوظيفي للمنشأ على المدى الطويل.

ومن خلال مناقشة هذه النتائج، يمكن استنتاج أن فعالية ألياف الكربون لا تعتمد فقط على خصائص المادة نفسها، بل أيضًا على جودة التنفيذ، وطريقة التثبيت، وعدد الطبقات المستخدمة، ونوع المادة اللاصقة. حيث إن أي قصور في هذه العوامل قد يؤدي إلى تقليل كفاءة التدعيم بشكل ملحوظ. كما أن الظروف البيئية مثل درجات الحرارة العالية أو الرطوبة قد تؤثر على أداء النظام المركب، مما يتطلب أخذ هذه العوامل في الاعتبار عند التصميم والتنفيذ (Cui&Yang, 2025).

وبشكل عام، تؤكد النتائج أن استخدام ألياف الكربون يمثل حلاً فعالًا ومتقدمًا في تقوية العناصر الخرسانية، حيث يحقق تحسينًا كبيرًا في الأداء الإنشائي مقارنة بالطرق التقليدية، مع توفير مستوى أعلى من الأمان وزيادة العمر الافتراضي للمنشآت الخرسانية.

الخاتمة

يُعد استخدام ألياف الكربون (CFRP) في تقوية العناصر الخرسانية من أهم التطورات الحديثة في مجال الهندسة الإنشائية، لما يوفره من تحسينات كبيرة في الأداء الميكانيكي وزيادة القدرة التحميلية للمنشآت الخرسانية. وقد أظهرت الدراسة من خلال الجوانب النظرية والعملية أن هذه التقنية تساهم بشكل فعال في رفع مقاومة الانحناء والقص، وتقليل انتشار الشروخ، وتحسين الصلابة العامة للعناصر الخرسانية.

كما تبين أن العناصر المدعمة بألياف الكربون تتميز بسلوك إنشائي أكثر أمانًا مقارنة بالعناصر التقليدية، حيث يكون الفشل تدريجيًا وليس مفاجئًا، مما يمنح المنشأ قدرة أفضل على التحذير قبل الانهيار. إضافة إلى ذلك، فإن خفة وزن هذه المواد ومقاومتها العالية للتآكل تجعلها خيارًا مناسبًا في عمليات إعادة تأهيل المنشآت القديمة أو المتضررة.

وبناءً على ما تم عرضه، يمكن القول إن ألياف الكربون تمثل حلًا هندسيًا متقدمًا وفعالًا في مجال تقوية المنشآت الخرسانية، مع إمكانية واسعة للتطبيق في المشاريع المستقبلية.

التوصيات

- يُوصى بتوسيع استخدام ألياف الكربون (CFRP) في تقوية وإعادة تأهيل المنشآت الخرسانية المتضررة أو غير الكافية إنشائيًا نظرًا لكفاءتها العالية في تحسين الأداء الإنشائي وزيادة العمر الافتراضي للمنشآت.
- يُنصح بالاهتمام الشديد بجودة التنفيذ أثناء تطبيق ألياف الكربون، خاصة في مراحل تجهيز السطح واستخدام مادة الإيبوكسي، لأن أي ضعف في هذه المراحل قد يقلل من كفاءة التدعيم.
- يُوصى بإجراء دراسات إضافية حول سلوك ألياف الكربون تحت الظروف البيئية القاسية مثل درجات الحرارة العالية والحريق والرطوبة، بهدف تحسين موثوقيتها في مختلف التطبيقات.
- يُفضل إجراء مقارنات مستقبلية بين ألياف الكربون (CFRP) ومواد التدعيم الأخرى مثل الألياف الزجاجية (GFRP) والألياف البازلتية لتحديد الأنسب لكل حالة إنشائية.
- يُوصى بتطوير نماذج تحليلية وعددية أكثر دقة تساعد في التنبؤ بسلوك العناصر الخرسانية المدعمة بألياف الكربون، مما يدعم عملية التصميم الهندسي بشكل أكثر كفاءة.
- يُنصح بتدريب الكوادر الهندسية والفنية على طرق تطبيق أنظمة CFRP بشكل صحيح لضمان تحقيق أفضل أداء إنشائي ممكن.

ملخص البحث

The study explores the ability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) t enhance reinforced concrete members. This paper recognizes the superior characteristics of CFRP, which include tensile strength, light weight, and non-corrosiveness. The study shows that CFRP increases the flexural and shear capacities of concrete structures and prevents crack formation. It has been shown through experiments and analysis that members with CFRP reinforcement have increased load capacity and ductile failure modes. Furthermore, CFRP is suggested as an effective method to repair deteriorated structures. Overall, this study proves that CFRP is an effective method to extend the life of concrete structures.

REFERENCES

[1] Muthukumarana, T. V., Arachchi, M. A. V. H. M., Somarathna, H. M. C. C., & Raman, S. N. (2023). A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *366*, 130173. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130173

[2] Aduwenye, P., Chong, B. W., Gujar, P., & Shi, X. (2024). Mechanical properties and durability of carbon fiber reinforced cementitious composites: A review. *Construction and Building Materials, 452*, 138822. https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2024.138822

[3] Guo, Z., Zhuang, C., Li, Z., & Chen, Y. (2021). Mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete (CFRC) after exposure to high temperatures. *Composite Structures, 256*, 113072. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020. 113072

[4] AL-Khafaji, A. A. G., Muhammed, S. H., Jadooe, A., & Abdulredha, M. (2024). Effect of strengthening by carbon fiber reinforced polymer sheets on the flexural behavior of reinforced self-compacting concrete beams under repeated loads. *Advances in Structural Engineering, 27*(5), 854–870. https://doi.org/10.1177/13694332241237587

[5] Abd elaziz, S., Khalil, E., & Hadhoud, H. (2023). Strengthening of reinforced concrete slabs using carbon fiber polymers. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University, 51*(4), 242–254. https://doi.org/10.21608/jesaun.2023. 189658.1202

[6] Wang, T. (2025). Experimental study on mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete. *Frontiers in Science and Engineering*, *5*(4). https://doi.org/10.54691/k0g7nz64

[7] Cui, Z., & Yang, Z. (2025). Study on the fire resistance of reinforced concrete structures strengthened with carbon fiber fabric. *Frontiers in Science and Engineering, 5*(8). https://doi.org/10.54691/vdhyqm24

[8] Mahdi, D. S., & Mohammed, H. A. (2024). State of the art: Carbon fiber reinforced concrete: A review. *Academic International Journal of Engineering Science*, *2*(2), 9–17. https://doi.org/10.59675/E222

[9] Mater, Y. M., Elansary, A. A., & Abdalla, H. A. (2022). Flexural behavior of recycled aggregate concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer. *Advances in Structural Engineering, 25*(14), 2998–3015. https://doi.org/10.1177/13694332221113039

[10] Jawad, M. G. A., & Albayati, A. H. (2025). Investigating fiber reinforcement effects on the performance of concrete pavements under repeated load. *Engineering, Technology&Applied Science Research, 15*(3), 23133–23140. https://doi.org/10.48084/etasr.10663