

آليات تقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء، دراسة تأثير بعض العناصر المضافة

Techniques or Reinforcing Wooden Beams Against Bending Forces, Study of the Effect of Some Additive Component

م. أنور عبدالله جديع الغانم

عضو هيئة تدريس في الهيئة العامة للتعليم التطبيقي والتدريب - معهد التدريب الانشائي

الملخص:

تهدف الدراسة إلى التعرف على كيفية مساهمة بعض تقنيات تقوية العوارض الخشبية على أداء هذه العوارض ضد قوى الانحناء. اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي وذلك من خلال مراجعة الدراسات ذات الصلة. أشارت الدراسة أن استخدام البوليمر المقوى بالألياف سواء الكربونية، الزجاجية، الأراميدية والبازلتية، حيث تعمل على تحسين الصلابة وتعزيز سعة التحمل، كما يمكن استخدام طرق مختلفة تشمل الحبال الفولاذية، الخيزران وهياكل التثبيت، وتقوية الشد العامودي. كما يجدر الإشارة إلى أهمية اصلاح الشقوق وإزالة التقشير والتلف كطريقة لتقوية العوارض الخشبية وتعزيز أداءها ضد قوى الانحناء. توصي الدراسة بضرورة فحص تأثير التكامل بين الطرق على أداء العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء.

الكلمات المفتاحية: العوارض الخشبية، قوى الانحناء، البوليمر المقوى بالألياف، الحبال الفولاذية.

Abstract

This study aims to identify how wooden beam-strengthening techniques contribute to the performance of these beams against bending forces. A descriptive approach was adopted by reviewing the relevant studies. Their study indicated that the use of fiber-reinforced polymers, such as carbon, glass, aramid, and basalt, improves stiffness and enhances bearing capacity. Different methods can also be used, such as the use of steel ropes, bamboo, fixing structures, and vertical tension strengthening. It is also worth noting the importance of repairing cracks and removing peeling and damage to strengthen wooden beams and enhance their performance under bending forces. This study recommends examining the effect of integration between methods on the performance of wooden beams against bending forces.

Keywords: Wooden beams, bending forces, fiber-reinforced polymer, steel ropes

المقدمة

يتميز الخشب بكونه مادة خفيفة الوزن، ذات تكلفة منخفضة ومظهر طبيعي له جاذبية خاصة وبسبب هذه الخصائص، يفضل الكثيرون استخدامه كمادة أساسية في انشاء الهياكل المبنية (Halicka & Slosarz, 2021). يستخدم الخشب على نطاق واسع في تشييد الأرضيات، الأسقف، العوارض الصناعية وغيرها (Kliger et al., 2016).

في المقابل، يواجه الخشب مجموعة من المحددات التي تؤثر على وتيرة استخدامه والتي تعزى بشكل أساسي لماهية الطبيعية فيواجه مشاكل التلف، التشقق التقشر، التشوه، الاهتزاز، العقد، الانكماش وغيرها من العيوب (Calderonia et al., 2006). الانحناء إحدى أهم الظواهر التي يمكن أن تؤدي إلى فشل أداء العناصر الخشبية، وذلك لتسببه في إجهادات شد وضغط طولية موزعة على عمق المقطع العرضي، ما يتسبب بتمزق الألياف الخشبية (Franke et al., 2015).

وعليه من المهم العمل على ايجاد آليات وطرق يمكن من خلال تقوية العوارض الخشبية وتعزيز قوتها لمقاومة قوى الانحناء والظواهر الأخرى. تركز معظم الدراسات ذات الصلة على استخدام البوليمرات المقوية بالألياف، حيث يتم فحص تأثير أنواع متعددة من الألياف على أداء هذه العوارض وقدرتها على مقاومة الانحناء (Jian, et al., 2022). زمن الجدير بالذكر أن هنالك العديد من الطرق الأخرى التي تحتاج إلى دراسة كالحبال الفولاذية المسامير الخشبية، الشد العامودي وغيرها، كما

يمكن تحقيق التكامل بين أكثر من طريقة كآلية فعالة في تقوية هذه العناصر. وعليه، تقدم الدراسة مراجعة نظرية للدراسات ذات الصلة بهذه الآليات لتقديم رؤية واضحة للإمكانيات المستخدمة في هذا المجال وفرص الجمع فيما بينها.

المشكلة

تتمثل مشكلة الدراسة في الحاجة إلى تقديم رؤية شاملة لآليات تقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء، ما يوفر للقارئ فرصة للمقارنة فيما بينهم وتحديد أكثر الطرق ملائمة ضمن ظروف معينة، فضلاً عن إمكانية تحقيق التكامل فيما بينها بحيث يتم تحقيق أفضل استفادة منها.

الأسئلة

تسعى الدراسة إلى الإجابة عن الأسئلة الآتية:

- ما الآليات المتاحة لتقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء؟
- ما هو البوليمر المقوى بالألياف وما أنواع؟
- كيف يعمل البوليمر المقوى بالألياف وأنواعه المختلفة على تقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء؟

- كيف تساهم الآليات المتاحة على تقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء؟

الأهداف

تهدف الدراسة إلى تحقيق ما يلي:

- التعرف على الآليات المتاحة لتقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء.
- التعرف على البوليمر المقوى بالألياف وأنواعه.
- التعرف على كيفية مساهمة البوليمر المقوى بالألياف وأنواعه المختلفة على تقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء.
- التعرف على كيفية مساهمة الآليات المتاحة على تقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء.

الأهمية

تكمن أهمية الدراسة في الجمع بين الآليات المتاحة لتقوية العوارض الخشبية مع التركيز على القدرات الخاصة بكل طريقة، الأمر الذي يثري المعرفة النظرية حول هذا الموضوع ويعزز من محتوى المكتبة البحثية العربية، خاصة وأنه لم يجد الباحث أي دراسات عربية في هذا المجال، وبالتالي فإن الدراسية تقدم مرجعاً أولياً للطلبة في كليات الهندسة في الجامعات العربية. من جهة أخرى، تساعد الدراسة على تقديم رؤية مقارنة حول آليات تقوية العوارض الخشبية وبالتالي يمكن للمهندسين الرجوع إليها لتحديد الطريقة الأفضل والأكثر توافقاً مع امكانياتهم والمواد المتوفرة لديهم.

المنهجية

اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي وذلك من خلال مراجعة الأدبيات ذات الصلة، مع التركيز على الموضوعات التي توفر اجابة شمولية عن أسئلة الدراسة.

الدراسات السابقة

جاءت دراسة (Borri & Corradi, 2011) بعنوان "تقوية عوارض الأخشاب باستخدام حبال فولاذية عالية القوة " بهدف التحقق من فعالية استخدام الأحبال الفولاذية في تقوية العوارض الخشبية تحت أحمال الانحناء. اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي ، حيث تم اجراء (21) اختبار للدفع المزدوج للقص تم إجراؤها لتحديد قوة البوليمرات المقوية بألياف الفولاذ و الملتصقة بمناشير خشبية. أشارت نتائج الاختبارات أن الترابط الخارجي لألياف الفولاذ يؤدي إلى انتاج زيادات كبيرة في صلابة الانحناء والسعة، وعليه فإن هذه الطريقة توفر طريقة فعالة واقتصادية لتقوية العوارض الخشبية والتي يمكن استخدامها كبديل للتقنيات المكلفة.

أما دراسة (Kliger et al., 2016) بعنوان "عوارض خشبية مقوية بصفائح بلاستيكية مقوية بألياف زجاجية: أداء محسن مع أنظمة مسبقة الإجهاد" فهدفت إلى التعرف على فاعلية تقوية العوارض الخشبية باستخدام صفائح بلاستيكية مقوية بألياف زجاجية. تم فحص فعالية طريقتين هي التعزيز السلبي أو الارتخاء القائم على وضع صفائح تقوية على كل من جانب الشد والضغط من

العارضة. أما الطريقة الثانية فتعتمد على تطبيق الإجهاد المسبق في مواد بلاستيكية مقوية بألياف زجاجية، أثبتت الطريقة الثانية فعاليتها لتعزيز قدرة تحمل العوارض وتقليل الانحناء فيها وتجنب الانفصال المبكر.

أما دراسة (Wdowiak–Postulak & Brol, 2020) بعنوان "الدونة لمنطقة الشد في العوارض الخشبية المنحنية المقواة بمواد البوليمر المقوى بألياف الكربون" فهتد إلى فحص فعالية تقوية العوارض الخشبية بالبوليمر المقوى بألياف الكربون في تحسين أداءها خاصة فيما يتعلق بزيادة الدونة في منطقة الشد لهذه العوارض. اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي من خلال اجراء مجموعة من الاختبارات. أشارت نتائج الدراسة أن استخدام هذا النوع من البوليمرات له تأثير إيجابي على سلوك وسلامة الهياكل الخشبية. حيث حظت زيادة في قوة انحناء العوارض المقوية. كما لوحظ زيادة في قدرة تحمل الأحمال للعوارض المقوية بنحو (23%) مقارنة بعوارض الغير مقوية. فضلاً عن ذلك، لوحظت زيادة في صلابة الانحناء بنسبة (36.29%) للعوارض المقوية. من جهة أخرى، بينت الدراسة أن البوليمر المقوى بألياف الكربون يساعد على تقليل تأثير ضعف الخشب الناجم عن العقد ، مما يؤثر بشكل مباشر على سلامة الهيكل.

هدفت دراسة (Halicka & Slosarz, 2021) بعنوان "تقوية عوارض الأخشاب باستخدام شرائح بوليميرية مقوية بألياف الكربون مسبقة الشد" إلى التعرف على فعالية الشرائح البوليميرية المقوية

بألياف الكربون مسبقة الشد في تقوية العوارض الخشبية. اعتمدت الدراسة المنهجية التجريبية حيث تم تعريض أربع سلاسل من العوارض الخشبية المقوية بألياف الكربون مسبقة الشد لمستويات مختلفة من الإجهاد المسبق على مدار 28 يوم فضلاً عن عدد من العوارض المرجعية غير المقوية، تم وصف نتائج انحناء أربع نقاط للعوارض المقوية بألياف الكربون مسبقة الشد، كما تم تحليل القوى القصوى وآليات الفشل بالإضافة إلى علاقات الحمل والانحراف في سلسلة العوارض الفردية بالمقارنة مع العوارض المرجعية، أشارت نتائج الدراسة فاعلية الشرائح البوليميرية المقوية بألياف الكربون مسبقة الشد في تقوية العوارض الخشبية وتقليل انحناءها.

أما دراسة (Chen et al., 2021) بعنوان "دراسة تجريبية لعوارض خشبية مقواة بمسامير الخيزران مع هيكل تثبيت" فجاءت بهدف فحص فاعلية تقوية العوارض الخشبية باستخدام مسامير الخيزران مع هيكل التثبيت، حيث يتم لصق مسامير الخيزران بأسفل العوارض الخشبية وتثبيتها ببوليمرات مقواة بألياف الكربون (CFRPs) أو دبابيس خشبية. اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي حيث تم إجراء اختبارات الانحناء لثمانية عوارض مقواة وعارضتين تحكم غير معززة بأي مواد إضافية، تمت دراسة تأثيرات أشكال مختلفة من التثبيت وسمك مسامير الخيزران على تأثير تقوية عوارض الخشب. أشارت نتائج الدراسة أن القدرة القصوى لتحمل للعوارض المقوية زادت بما يقارب 20-70%، فيما ازدادت صلابة المقطع العرضي بما يقارب 40-160%. علاوة على ذلك، تؤكد نتائج الاختبار أن البلاستيك المقوى بألياف الكربون والدبابيس الخشبية يمكن أن تلتصق بقوة بعوارض الخشب ولوح

الخيزران، وبالتالي فإن تقوية العوارض الخشبية بألواح الخيزران وهياكل التثبيت يمكن أن يعزز من صلابتها وقوة تحملها.

فيما هدفت دراسة (Jian, et al., 2022) بعنوان "مراجعة حول تقوية عوارض الأخشاب باستخدام البوليمرات المقوية بالألياف"، جاءت هذه الدراسة بهدف دراسة تقوية العوارض الخشبية باستخدام البوليمرات المقوية بالألياف. اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي القائم على مراجعة الدراسات السابقة. عملت الدراسة على تحديد الترابط بين البوليمر المقوى بالألياف وعوارض الأخشاب مع التركيز على العوامل المؤثرة بالإضافة إلى نماذج الانزلاق والترابط ذات الصلة، كما راجعت الدراسة الأوراق البحثية التجريبية لتقييم أداء الانحناء لعوارض الأخشاب المقوية بقضبان وألواح ولفائف البوليمر المقوى بالألياف. تشير نتائج الدراسة أن استخدام البوليمرات المقوية بالألياف يعد طريقة فعالة لتقوية العوارض الخشبية وتقليل انحناءها.

أما دراسة (Dygas et al., 2024) بعنوان "دراسة أولية حول سلوك الانحناء للعوارض الخشبية الصلبة المقوية بقضبان بوليميرية مقوية بألياف البازلت" فهدفت إلى اختبار فعالية تقوية الهياكل الخشبية باستخدام قضبان مركبة. اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي. أجريت التجارب على عوارض خشبية صلبة مصنوعة من خشب التتوب. تم تعزيز العوارض بقضبان من البوليمر المقوى بألياف البازلت بقطر 8 مم، ومن ثم تم لصق القضبان في قنوات على طول السطح السفلي باستخدام

راتنج الإيبوكسي (Epoxy resin) كمادة لاصقة، مع العلم أنه تم إجراء اختبارات القوة وفقاً لمتطلبات (EN 408+A1:2012)، من ثم تم العمل على اعتماد مخطط الانحناء بأربع نقاط، تم إجراء الاختبارات في السلسلتين؛ العوارض غير المقوية (أ) والعوارض المقوية بالمواد المركبة (ب). تم اختبار خمسة عناصر في كل سلسلة. أشارت نتائج الدراسة إلى أن التعزيز أدى إلى زيادة متوسطة في قيمة عزم الانحناء بنسبة (8.41%) زادت قيمة الانحراف عند الفشل بنسبة (19.77%).

الإطار النظري

يستخدم الخشب على نطاق واسع في كافة أشكال الهياكل الإنشائية سواء الهياكل الصغيرة كبيوت المزارع البسيطة، وحتى المباني الضخمة كالكنايس، ويعزى ذلك إلى توافره وتكلفته المنخفضة فضلاً عن وزنه الخفيف وانخفاض تكاليف تشغيل (Halicka & Slosarz, 2021)، كما يعد الخشب إحدى الموارد الطبيعية المتجددة والتي تعطي مظهرًا طبيعيًا جذابًا ونسبة عالية من القوة إلى الوزن عند مقارنته بمواد البناء التقليدية مثل الخرسانة والفولاذ الهيكلي، كما تشير الدراسات أن المباني التي تستخدم الخشب توفر درجة أفضل من الراحة الحرارية لمستخدميها (Jian, et al., 2022).

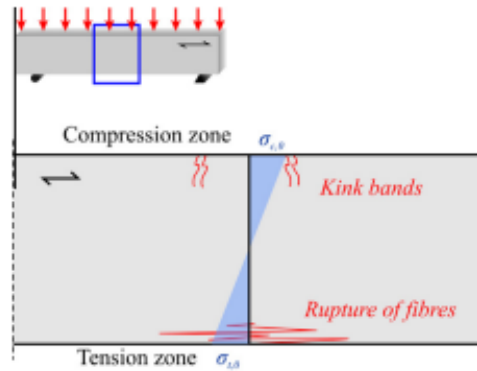
في المقابل، تحتاج العوارض الخشبية المستخدمة في إنشاء الأرضيات، الأسقف، العوارض الصناعية، والجسور الخشبية إلى تقوية وتعزيز خاصة في حالة زيادة الأحمال أو تدهور الأخشاب خلال دورة حياتها، حيث تشهد الأخشاب بعض العيوب الناتجة عن كونها مادة طبيعية عضوية،

وبالتالي يظهر عيوب ذات طبيعة بيولوجية وليست ميكانيكية أو فيزيائية. على سبيل المثال؛ العقد، الاهتزازات، شقوق الانكماش، عيوب الشكل وانحدار الحبوب، بالإضافة إلى الشذوذ الهيكلي، أي التشقق والتشوه الهندسي الناجم عن الأحمال طويلة الأجل (Calderonia et al., 2006). علاوة على ذلك، تتعرض الهياكل الخشبية لتأثير العديد من العمليات البيولوجية والحرائق وغيرها (Dygas et al., 2024).

من جهة أخرى، تتعرض العوارض الخشبية لخطر الانحناء، يشكل الانحناء إحدى أشكال الفشل في أداء العوارض الخشبية، يؤدي الانحناء إلى إجهادات شد وضغط طولية موزعة على عمق المقطع العرضي، ما يتسبب بتمزق ألياف الخشب، كما هو موضح في الشكل (1/أ). يؤدي إجهاد الضغط الطولي إلى تشوهات مرنة وبلاستيكية تأخذ شكل بلاط مموج تتسبب بما يسمى بأشرطة الانحناء. وبسبب العيوب الطبيعية، مثل العقد، يمكن تقليل قوة الشد مقارنة بقوة الضغط. لذلك، يوصف فشل الانحناء بشكل أساسي بالفشل الهش لعوارض الخشب داخل منطقة الشد، كما هو موضح في الشكل (1/ب). يصنف فشل الانحناء على أنه حرج ويمكن أن يؤدي إلى فشل واحد للعنصر الهيكلي أو البناء بأكمله. وعليه فإنه من المهم العمل على تقوية هذه الهياكل وإضافة بعض المركبات التي يمكنها تعزيز أداءها وزيادة قدرتها على مقاومة قوى الانحناء (Franke et al., 2015).



(ب)



(أ)

الشكل (1): أ: رسم لكيفية حدوث لفشل الانحناء. ب: فشل الشد أثناء الانحناء، المرجع: (Franke et al., 2015).
من جهة أخرى، يعد الخشب مادة مناسبة لتغطية الجور الكبيرة وخاصة المنحنية منها، إلا أن هذا الانحناء قد يزيد بمرور الوقت ولهذا فإنه من المهم تقوية العوارض الخشبية ليس فقط من أجل تعزيز سعة الأحمال، بل أيضاً لتقليل الانحناءات المتوقعة (Halicka & Slosarz, 2021). يمكن أن يؤدي تعزيز وتقوية العوارض إلى تحسين قدرة التحمل وجعل الهيكل أكثر أماناً وتلبية متطلبات الأداء الأعلى (Jian, et al., 2022). وعليه فإن هذه الدراسة تركز على الآليات والمركبات المضافة التي يمكن استخدامها لتقوية وتعزيز العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء. وعليه نستعرض أهم الآليات والإضافات المستخدمة من أجل تقوية العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء.

أولاً: البوليمر المقوى بالألياف (FRP–Fiber Reinforced Polymer)

تعرف البوليمرات المقوية بالألياف على أنها نوع من أنواع المواد عالية الأداء التي تتشكل عن طريق خلط مادة الألياف ومادة المصفوفة (الراتنج) بنسبة معينة (Jian, et al., 2022). تستخدم مادة البوليمر المقوية بالألياف، لتحسين الخصائص الميكانيكية للعوارض الخشبية، تتمتع هذه المادة بصلابة عالية جدًا ومتانة وخفة وزن، ونظرًا للمزايا التي توفرها هذه المادة من قوة ترابط وتلاصق، فإن إضافة كمية صغيرة من مادة (FRP) شديدة الصلابة إلى العوارض الخشبية تعمل على تحسين الصلابة الكلية للعوارض الخشبية، والذي يرجع أساسًا إلى الاختلاف الكبير بين معامل مرونة الخشب ومادة (FRP) المركبة (Kliger et al., 2016)، وعليه يمكن أن يؤدي تعزيز (FRP) أيضًا إلى تحسين قدرة التحمل القصوى وصلابة الانحناء للعوارض الخشبية (Jian, et al., 2022).

برزت هذه المادة كوسيلة لتقوية العوارض الخشبية عندما تم استخدام الصفائح الفولاذية لتقويتها ، إلا أن اختلاف خصائص المادتين أدى إلى فشل في خط اللصق بين المادتين، ولتجنب هذه المشاكل تم استخدام صفائح البوليمر المقوى بالألياف، حيث يقاوم لصق هذه الصفائح عن جانب الشد من العارضة قوى الانحناء المتوقعة، وذلك من خلال تعزيز الاجهاد المسبق في مادة (FRP) قبل الالتصاق بجانب الشد للعناصر المنحنية، الأمر الذي يعزز من فعالية هذه المواد وقدرتها على تحمل الاجهادات والاحمال المختلفة (Kliger et al., 2016).

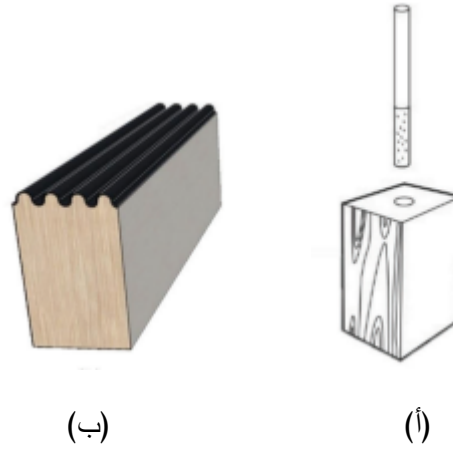
إن طرق الترابط بين العوارض الخشبية و البوليمرات المقوية بالألياف متعددة ولها تأثير هام على الخصائص الميكانيكية للمكونات، حيث أن الترابط المناسب يؤثر على مقاومة الانحناء. يمكن ربط العوارض الخشبية بهذه البوليمرات بطرق متعددة تشمل؛ التعزيز الملتصق خارجياً (Externally Bonded Reinforcement-EBR)، والتثبيت الرأسي بالقرب من السطح (Vertical near surface mounting -VNSM)، والتثبيت الأفقي بالقرب من السطح (Horizontal near surface mounting -HNSM) والقضبان الملتصقة (Glued-in-rods -GIR) ، الشكل (2). ويتم تحقيق هذا الترابط من خلال مجموعة من المواد اللصقة ، أهمها؛ راتنج الإيبوكسي (Epoxy Resin) والبولي يوريثين (Polyurethanes) والفينول (Phenolics) والأمينوبلاستيك (Aminoplastics)، يتميز راتنج الإيبوكسي بمقاومة كيميائية ممتازة، وخاصة للقلويات، فيما يتسم البولي يوريثين بقوة عالية ومقاومة للتمزق ومقاومة للتآكل، أما الفينول فيتمتع بمقاومة جيدة للحرارة والحريق والماء والأحماض، إلا أنه لديه مقاومة ضعيفة للقلويات، والأمينوبلاستيك فيقاوم بصورة جيدة الماء وعوامل الطقس (Bin et al., 2021) .



(أ) (ب) (ج) (د)

الشكل (2): طرق ربط العوارض الخشبية بهذه البوليمرات، (أ): القضبان الملتصقة (GIR)، (ب): والتثبيت الأفقي بالقرب من السطح (HNSM)، (ج): والتثبيت الرأسي بالقرب من السطح (VNSM)، (د): التعزيز الملتصق خارجياً (EBR)، المرجع: (Jian, et al., 2022)

تركز الأدبيات على نوعين من أنواع الترابط بين العوارض الخشبية والبوليمرات، وهما الترابط بين العوارض الخشبية وقضبان (FRP) من جهة و الترابط بين العوارض الخشبية وصفائح (FRP) كم جهة أخرى. تتمتع قضبان (FRP) بإمكانات كبيرة لتقوية العوارض ضد قوى الانحناء، يتم تثبيت قضبان (FRP) بالطبقة السفلية، ثم تثبيت قضبان (FRP) بأسفل الخشب الرقائقي المقوى بالألياف باستخدام طبقة لاصقة من مادة (راتنج الإيبوكسي)، يعد ذلك يتم تثبيت الأطراف بواسطة جهاز تثبيت. أظهرت هذه الطريقة خصائص ميكانيكية محسنة، وانخفاض في تباين خصائص الخشب الرقائقي المقوى بالألياف، فضلاً عن انخفاض في تكلفة (FRP) وذلك لاستخدام عدد أقل من المواد (الشكل 3/أ). من جهة أخرى تستخدم وصفائح (FRP) من أجل عملية الربط، والفرق بين القضبان والصفائح أن الصفائح توفر سطح أوسع للترابط، وتعتمد فاعلية هذا الترابط على عدة عوامل طول الرابطة ونوع الصفائح والتوجيه النسبي للألياف وغيرها، (الشكل 3/ب) (Jian, et al., 2022).



الشكل (3): (أ): طريقة الترابط بين قضبان FRP والعوارض الخشبية، (ب): الترابط بين صفائح FRP والعوارض الخشبية، المرجع: (Jian, et al., 2022)

يوجد أنواع متعددة من البوليمرات المقوية بالألياف (FRP) وتشمل بوليمر مقوى بألياف الكربون (CFRP)، وبوليمر مقوى بألياف الزجاج (GFRP)، و بوليمر مقوى بألياف الأراميد (AFRP)، وبوليمر مقوى بألياف البازلت (BFRP) (Wolter, et al., 2020)، ولقد أجرى الباحثون العديد من الدراسات فيما يتعلق بالأداء النسبي لهذه الأنواع من البوليمرات، حيث وجدوا أن معامل المرونة للبوليمر المقوى بألياف البازلت (BFRP) أكثر توافقاً مع الخشب وبالتالي يمكن أن توفر رابطاً فائقاً عند استخدامه للتقوية، بينما يوفر البوليمر المقوى بألياف الكربون (CFRP) قوة شد أعلى من كل البوليمر المقوى بألياف الزجاج (GFRP)، البوليمر المقوى بألياف البازلت (BFRP)؛ قد تصل إلى خمسة أضعاف قوة الشد للفولاذ العادي (Jahreis & Rautenstrauch, 2014).

أجريت العديد من الدراسات حول استخدام هذه الأنواع لتحديد الفرق في الأداء فيما بينها، تشير الدراسات أن استخدام البوليمر المقوى بألياف الكربون (CFRP) في منطقة الشد يعزز من سعة التحمل، والصلابة حيث أفادت دراسة (Borri et al., 2005) أن سعة التحمل زادت بمقدار (30%) عند استخدام قضيب واحد وأكثر من (50%) لقضيبين، فيما يتعلق بالعوارض المرجعية. تم تقليل الانحراف بنسبة (22%) لقضيب واحد وبنسبة (25.5%) لقضيبين، كما أن استخدام ثلاثة طبقات من البوليمر المقوى بألياف الكربون مثبتة في أسفل العوارض أدى إلى زيادة الصلابة بنسبة (60%).

من جهة أخرى تؤكد نتائج دراسة (Halicka & Slosarz, 2021) أن تقوية العوارض الخشبية بشرائط البوليمر المقوى بألياف الكربون (CFRP) مسبقاً الشد أدت إلى توسيع سعة الانحناء بحوالي (13%) مقارنة بالعوارض الخشبية غير المقوية. علاوة على ذلك، تشير دراسة (André & Kliger, 2009) من خلال مراجعتها لعدد من الدراسات أن استخدام البوليمر المقوى بألياف الكربون (CFRP) يؤدي إلى زيادة قوة العوارض الخشبية بما يقارب (40-70%) فضلاً عن سلوك أكثر ليونة وزيادة في الصلابة مقاومة أكبر للانحناء. وهذا ما أكدت عليه دراسة (Li et al., 2014) والتي أشارت إلى أن استخدام هذه البوليمرات يعزز من قوة العوارض بنسبة (39-61%) فضلاً عن زيادة في مقاومة قوى الانحناء.

أما البوليمرات المقوية بألياف الزجاج (GFRP) فإن استخدامها في تقوية العوارض الخشبية يزيد من إجهاد الشد والقوة ضد الانحناء (Li et al., 2014). علاوة على ذلك، فإن تقوية العوارض الخشبية بصفائح البوليمرات المقوية بألياف الزجاج مع تعريضها لاجهاد مسبق أدى إلى زيادة قوة العوارض الخشبية بنسبة (95%) من قوة العوارض غير المقوية وبنسبة (38%) من قوة العوارض غير مسبقة الاجهاد (André & Kliger, 2009).

علاوة على ذلك يتم استخدام قضبان البوليمر المقوية بألياف البازلت (BFRP) لتقوية العوارض الخشبية، أجريت دراسة (Dygas et al., 2024) لاختبار فعالية تقوية الهياكل الخشبية بواسطة قضبان البوليمر المقوية بألياف البازلت، أشارت نتائج الدراسة أن هذا النوع من التقوية أدى إلى تحسين قوة العوارض الخشبية، حيث أدى وضع قضيبين من (BFRP) بقطر (8) مم في منطقة الشد إلى زيادة قدرة العوارض على التحمل بنسبة (8.41%)، كما أدى استخدام هذا النوع من القضبان إلى زيادة سعة التحمل مع ملاحظة زيادة في قيم الليونة، حيث تضاعفت هذه القيمة تقريباً، وبالتالي فإن تقوية العوارض الخشبية بقضبان البازلت هو آلية فعالة لتعزيز قوتها على مقاومة قوى الانحناء.

ثانياً: الحبال الفولاذية عالية القوة

يؤدي استخدام العوارض الخشبية عالية القوة في تعزيز أداء العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء، وذلك من خلال زيادة صلابة الانحناء وسعته، وهذه الطريقة تعد أقل تكلفة مقارنة باستخدام

البولمرات المقوية بالألياف الزجاجية والكربونية (Borri & Corradi, 2011). علاوة على ذلك، تعمل الحبال الفولاذية على تقوية العوارض الخشبية ضد فوة الانحناء من خلال زيادة اللدونة وتعزيز القدرة على تحمل الاحمال، في دراسة أجريت على تأثير الحبال الفولاذية على تقوية العوارض الخشبية، تبين أن العوارض المقوية بالحبال الفولاذية مسبقة الاجهاد زيادة بنسبة (37.9%) من الصلابة، و (40.2%) من الحمل الأقصى، و(79.1%) زيادة في اللدونة مقارنة بالعوارض الغير مقوية (Luca & Marano, 2012). من جهة أخرى، تعمل الحبال الفولاذية على تغيير خصائص التشوه، خاصة عند ادخال الحبال في مسار على شكل حرف (S)، حيث تساعد هذه الطريقة على تأخير فشل أنظمة العوارض تحت الأحمال الحرجة (Koshcheev et al, 2020).

ثالثاً: الدبابيس الخشبية/ الخيزران (Bamboo Scrimber) وهياكل التثبيت

تعد مادة الخيزران من المواد الطبيعية الصديقة للبيئة، يتمتع الخيزران بخصائص ميكانيكية مماثلة للخشب، ونسبة قوة إلى وزن جيدة وأداء زلزالي جيد، كما يتميز بقدرة عالية على مقاومة الانحناء ومقاومة الضغط، وعليه فإن تقوية العوارض الخشبية بالخيزران يحسن من قدرة الانحناء والصلابة والسحب وقدرة القص، غالباً ما يتم تثبيت دبابيس الخيزران باستخدام البوليمرات المقوية بالألياف (FRP)، الأمر الذي يعزز أداءها، وهذا ما أكدته دراسة (Chen et al., 2021) والتي أشارت إلى زيادة قوة التحمل النهائية للعوارض الخشبية المقوية بالخيزران وبمادة (CFRP) بنسبة

(42%)، بينما زادت بنسبة (50%) للعوارض الخشبية المقوية بالخيزران وهياكل التثبيت، وبالتالي فإن التكامل بين الخيزران وهياكل التثبيت و البوليمرات المقوية بالألياف، يمكن تحسين قدرة الانحناء والصلابة والمرونة بشكل كبير.

رابعاً: إصلاح الشقوق أو التقشير الناتجة عن الانكماش

بالتكامل مع اضافات وتقنيات تقوية أخرى، يمكن لإصلاح الشقوق والتقشير الموجود في العوارض الخشبية أن يساهم في تقويتها، حيث أنه من الضروري عمومًا إصلاح شقوق الانكماش في مناطق الإجهادات القصية العالية والإجهادات الشد العالية. تهدف عملية الإصلاح إلى استعادة قدرة تحمل الاحمال للخشب الرقائقي الملتصق، وذلك بعد ان يتم تقييم هذه الشقوق من قبل خبراء، للتخطيط لعملية اصلاحها بصورة صحيحة. بصورة عامة تعتمد عملية الإصلاح على قطع الشقوق باستخدام المنشار وغيرها من الأدوات لتنظيف الفتحات، ومن ثم ملئها بمادة لاصقة مناسبة، يجب تنظيف الفتحة وتهويتها للحصول على عملية لصق فعالة (Franke et al., 2015) (انظر الشكل4).

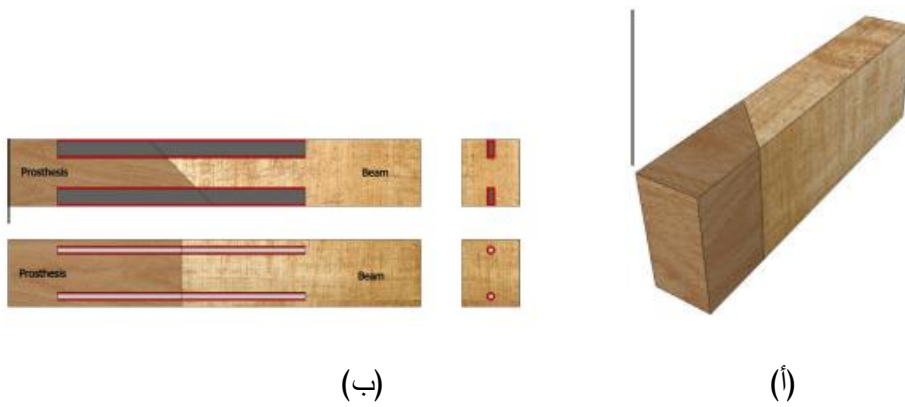


الشكل (4): نتيجة طرق الإصلاح المختلفة (الصب والحقن) لثلاثة من المواد اللاصقة، المرجع: (Franke et al., 2015)

خامساً: استبدال الأجزاء التالفة أو المتحللة

تسبب بعض أنواع الحشرات والفطريات في تحلل الخشب وهشاشته، يحدث هذا التحلل في الغالب عند أجزاء معينة كالأطراف وأماكن الاتصال بالجدران وغيرها، أي أن التلف لا يصل إلى كافة أجزاء العارضة الخشبية بل هو تلف أو تحلل موضعي الأمر الذي يتسبب انخفاض قوة العارضة الخشبية وقدرتها على التحمل، وعليه، يجب إزالة الجزء المتحلل أو التالف ومن ثم استبداله بجزء صناعي ووصله بالعارضة الخشبية من خلال أوتاد خشبية أو مادة لاصقة (انظر الشكل 5/أ) أو عن طريق قضبان وألواح ملتصقة (الشكل 5/ب) (Pizzo & Schober, 2008) وهذه الطريقة هي الأكثر شيوعاً، حيث يتم استبدال الخشب التالف بطرف اصطناعي خشبي يتم ربطه بالخشب السليم في

العارضة الأصلية باستخدام قضبان أو ألواح من الصلب أو البوليمر المقوى بالألياف. باستخدام هذه الطريقة، يكون نطاق التدخل محدودًا ويتم الحفاظ على قدرة التحمل (Carvalho, 2008).

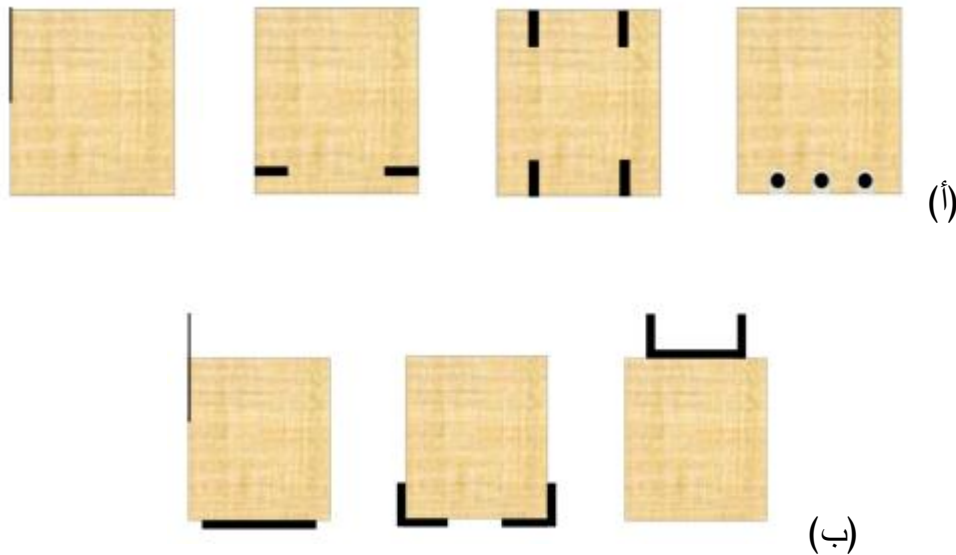


الشكل (5): (أ): اصلاح التلف من خلال وصل الخشب بطرف صناعي وتدد، (ب): إصلاح العارضة باستخدام قضبان أو ألواح ملتصقة، المرجع: (Franke et al., 2015).

سادساً: التقوية في الشد العامودي

يمكن أن ينشأ الفشل في الشد العمودي في العوارض الخشبية المسننة وحول الثقوب وفي العوارض المنحنية أو المدببة أو المائلة. يمكن تحقيق تعزيز العوارض في هذه الحالات باستخدام التقوية الداخلية أو الخارجية. تعتمد التقوية الداخلية على مسامير ذاتية اللولب أو قضبان فولاذية ملولبة مثبتة أو مثقوبة أو قضبان أو أنابيب بلاستيكية مقوية بالألياف الزجاجية (الشكل 6/أ). أما التقوية الخارجية فتتم عن طريق التثبيت الميكانيكي أو لصق صفائح من الألواح الخشبية، مثل الخشب

الرقائقي أو صفائح بوليمر مقوية بالألياف الزجاجية أو صفائح المسامير (الشكل 6/ب) (Franke et al., 2015).



الشكل (6): (أ) التقوية الداخلي في طريقة الشد العامودي، (ب) التقوية الخارجية في طريقة الشد العامودي، المرجع:

(Franke et al., 2015)

الخاتمة

يعد الانحناء إحدى أشكال الفشل الذي يواجه العوارض الخشبية المستخدمة في تشييد الهياكل الإنشائية المختلفة. نظراً لأهمية الخشب في صناعة التشييد فإنه من المهم إيجاد آليات تقوي العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء من أهم هذه الآليات التقوية بالبوليمر المقوى بالألياف. تعمل هذه الطريقة على تحسين الخواص الميكانيكية للعوارض الخشبية، تحسين الصلابة وسعة التحمل، وتستخدم على نطاق

واسع في تقوية العوارض الخشبية بالاعتماد على أربعة أنواع هي؛ بوليمر مقوى بألياف كل من الكربون الزجاج الأراميد والبازلت. ولكل منه تأثير خاص على أداء العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء. من جهة أخرى يمكن استخدام طرق مختلفة تشمل الحبال الفولاذية، الخيزران وهياكل التثبيت، وتقوية في الشد العامودي، فضلاً عن ذلك، ونظراً لكون الخشب مادة طبيعية فإنه يتعرض للشقوق والتقشير وأحياناً التلف، وعليه فإنه من المهم العمل على اصلاح هذه الشقوق وإزالة الجزئيات التالفة كطريقة لتقوية العوارض الخشبية وتعزيز أداءها ضد قوى الانحناء. ويجدر الإشارة أن التكامل بين بعض هذه التقنيات يوفر فاعلية أكبر، وعليه يمكن أن تركز الدراسات المستقبلية على بحث فاعلية هذا التكامل وتأثيره على أداء العوارض الخشبية ضد قوى الانحناء.

قائمة المراجع

- André, I., & Kliger, R. (2009). STRENGTHENING OF TIMBER BEAMS USING FRP, WITH EMPHASIS ON COMPRESSION STRENGTH: A STATE OF THE ART REVIEW. *Asia – Pacific Conference on FRP in Structures*, (pp. 193-202). Seoul, Korea .
- Bin, L., Jian, Z., Xiaojian, Z., & Guanben, D. (2021). Effects on the protection of bamboo by cold plasma and 2D resin-based protective agent. *Journal of Forestry Engineering*, 6 (2), 57-63.

- Borri, A., & Corradi, M. (2011). Strengthening of timber beams with high strength steel cords. *Composites: Part B*, 42 , 1480-1491.
- Borri, A., Corradi, M., & Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites Part B: Engineering*, 36 (2), 143-153.
- Calderonia, C., Matteisb, G. D., Giubileoa, C., & Mazzolani, F. (2006). Flexural and shear behaviour of ancient wooden beams: Experimental and theoretical evaluation. *Engineering Structures*, 28 , 729-744.
- Carvalho, L. H. (2008). Core Document of COST E34 “Bonding of Timber”. In *Lignovisionen* (pp. 197-201). Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences.
- Chen, S., Wei, Y., Peng, D., Zhao, K., & Hu, Y. (2021). Experimental investigation of timber beams strengthened by bamboo scrimber with anchorage structure. *Structures*, 33, 1-11.
- Dygas, J., Bakalarz, M. M., & Kossakowski, P. G. (2024). Preliminary Study on the Bending Behavior of Solid Timber Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars. *Applied Sciences*, 14 , 1-13.
- Franke, S., Franke, B., & Harte, A. M. (2015). Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art. *Construction and Building Materials*, 97 , 2-13.

- Halicka, A., & Slosarz, S. (2021). Strengthening of timber beams with pretensioned CFRP strips. *Structures*, 34 , 2912-2921.
- Jahreis, M., & Rautenstrauch, K. (2014). Rehabilitation, Upgrading and Repair of Historic Timber Structures with Polymer Concrete and FRP-Reinforcement. In S. Aicher, H.-W. Reinhardt, & H. Garrecht, *Materials and Joints in Timber Structures, Recent Developments of Technology* (pp. 485-492). Springer Nature Link .
- Jian, B., Cheng, K., Li, H., Ashraf, M., Zheng, X., Dauletbek, A., . . . Zhou, K. (2022). A Review on Strengthening of Timber Beams Using Fiber Reinforced Polymers. *journal of renewable materials* , 10(8), 2073-2098 .
- Kliger, I. R., Haghani, R., Brunner, M., Harte, A. M., & Schober, K.-U. (2016). Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74 , 319-330.
- Koshcheev, A., Roshchina, S., & V. Aleksiiievets, B. L. (2020). Local deformation and strength characteristics of S-shaped reinforcement in wood. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 896, 1-11.

- Li, Y.-F., Tsai, M.-J., Wei, T.-F., & Wang, W.-C. (2014). A study on wood beams strengthened by FRP composite materials. *Construction and Building Materials*, 62 , 118-125.
- Luca, V. D., & Marano, C. (2012). Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars. *Construction and Building Materials*, 30 , 206-217.
- Pizzo, B., & Schober, K.-U. (2008). On site interventions on decayed beam ends. In M. Dunky, B. Källander, M. Properzi, K. Richter, & M. V. Leemput, *Core Document of the COST Action E34. Bonding of Timber* (pp. 40-49). Vienna: Univerität für Bodenkultur.
- Wdowiak-Postulak, A., & Brol, J. (2020). Ductility of the Tensile Zone in Bent Wooden Beams Strengthened with CFRP Materials. *Materials*, 13 , 1-16.
- Wolter, N., Beber, V. C., Sandinge, A., Blomqvist, P., Goethals, F., Hove, M. V., . . . Koschek, K. (2020). Carbon, Glass and Basalt Fiber Reinforced Polybenzoxazine: The Effects of Fiber Reinforcement on Mechanical, Fire, Smoke and Toxicity Properties. *Polymers*, 12 (10) , 1-15.