Libyan Open University Journal of Applied Sciences (LOUJAS)
Volume 2 - Issue 2 - 2026 - Pages 353-365

Methods for Repairing Cracks and Fissures in War-Damaged and Aging Structures in Libya: An Integrated Engineering Approach

Mohamed Alfitoury Masoud[*1] , Khaled Omar Mohamed Oraibi[2] , Mohamed Ahmed Ahbil Aldlouly[3]
[1,2,3] Department of Civil Engineering, Libyan Center for Engineering Research and Information Technology, Bani Walid, Libya.
***Email (for reference researcher)** mohahmeed85@yahoo.co.uk

طرق معالجة التصدعات والتشققات في المنشآت المتضررة بالحروب وتقادم الزمن في ليبيا: رؤية هندسية متكاملة

محمد الفيتوري مسعود قريرة[1*] ، خالد عمر محمد أعريبي [2] ، محمد احمد احبيل الدلولي[3]
[1،2،3] قسم الهندسة المدنية، المركز الليبي للبحوث وتقنية المعلومات، بني وليد، ليبيا

Received: 01-09-2026; Accepted: 27-10-2026; Published: 29-10-2026

Abstract:
Cracking and deterioration in buildings and infrastructure have become significant challenges in Libya due to the combined effects of armed conflicts, aging structures, inadequate maintenance, and harsh environmental conditions. These factors can compromise structural integrity, reduce service life, and threaten the safety of occupants. This paper presents an integrated engineering perspective on the diagnosis, repair, and strengthening of cracks in structures affected by war damage and long-term deterioration in Libya. It reviews the main types of cracks and their causes, including blast-induced damage, vibration, concrete shrinkage, reinforcement corrosion, excessive loading, differential foundation settlement, and construction defects. The paper also examines structural assessment techniques, emphasizing visual inspection, crack monitoring, non-destructive testing, and selected destructive tests to identify the underlying causes and evaluate the extent of damage. Available repair and strengthening methods are discussed, including epoxy injection, polymer-modified repair mortars, non-shrink grout, concrete and steel jacketing, corrosion protection, and foundation rehabilitation. Particular attention is given to fiber-reinforced polymer (FRP) composites because of their high tensile strength, lightweight properties, corrosion resistance, and potential to improve the performance of damaged structural elements. The discussion further highlights the practical challenges facing rehabilitation projects in Libya, including limited resources, insufficient specialized expertise, inconsistent construction quality, and logistical constraints. The paper emphasizes that successful rehabilitation requires accurate diagnosis, appropriate selection of repair materials, qualified engineering supervision, and regular preventive maintenance. An integrated, condition-based approach can support safer rehabilitation, extend the service life of existing structures, and contribute to sustainable reconstruction and infrastructure resilience in Libya.

Keywords : Structural cracks; war-damaged structures; structural rehabilitation; concrete deterioration; non-destructive testing.

الملخص:
أصبحت ظاهرة التصدع وتدهور حالة المباني والبنية التحتية في ليبيا تشكل تحديات كبيرة، وذلك نتيجة لتضافر عدة عوامل تشمل النزاعات المسلحة، وتقادم المنشآت، ونقص الصيانة، والظروف البيئية القاسية. إذ يمكن لهذه العوامل أن تقوض السلامة الإنشائية، وتقلص العمر الافتراضي للمنشآت، وتهدد سلامة شاغليها. تقدم هذه الورقة البحثية رؤية هندسية متكاملة حول تشخيص ومعالجة وتدعيم الشقوق في المنشآت المتضررة جراء الحرب أو التدهور طويل الأمد في ليبيا. وتستعرض الورقة الأنواع الرئيسية للشقوق وأسبابها، بما في ذلك الأضرار الناجمة عن الانفجارات، والاهتزازات، وانكماش الخرسانة، وتآكل حديد التسليح، والأحمال المفرطة، وهبوط الأساسات غير المتكافئ، والعيوب الإنشائية. كما تتناول الورقة تقنيات التقييم الإنشائي، مع التركيز على الفحص البصري، ومراقبة الشقوق، والاختبارات غير الإتلافية، وبعض

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الاختبارات الإتلافية المختارة لتحديد الأسباب الجذرية وتقييم حجم الأضرار. وتناقش الورقة أيضاً طرق الإصلاح والتدعيم المتاحة، مثل الحقن بمادة الإيبوكسي، وملاط الإصلاح المعدل بالبوليمر، ومواد الحشو (الجراوت) غير القابلة للانكماش، والتدعيم بقمصان خرسانية أو فولاذية، والحماية من التآكل، وإعادة تأهيل الأساسات. ويُولى اهتمام خاص للمواد المركبة من البوليمر المقوى بالألياف (FRP) نظراً لما تتمتع به من قوة شد عالية، وخفة في الوزن، ومقاومة للتآكل، وقدرة على تحسين أداء العناصر الإنشائية المتضررة. وعلاوة على ذلك، تسلط الورقة الضوء على التحديات العملية التي تواجه مشاريع إعادة التأهيل في ليبيا، بما في ذلك محدودية الموارد، ونقص الخبرات المتخصصة، وتفاوت جودة البناء، والقيود اللوجستية. وتؤكد الورقة أن نجاح عمليات إعادة التأهيل يتطلب تشخيصاً دقيقاً، واختياراً مناسباً لمواد الإصلاح، وإشرافاً هندسياً مؤهلاً، وصيانة وقائية دورية. ومن شأن اتباع نهج متكامل يعتمد على حالة المنشأة أن يدعم عمليات إعادة تأهيل أكثر أماناً، ويطيل العمر الافتراضي للمنشآت القائمة، ويساهم في تحقيق إعادة إعمار مستدامة وتعزيز مرونة البنية التحتية في ليبيا.

الكلمات المفتاحية: الشقوق الهيكلية؛ المباني المتضررة من الحرب؛ إعادة تأهيل الهياكل؛ تدهور الخرسانة؛ الاختبارات غير المدمرة.

1. المقدمة

تُعد البنية التحتية للمباني بمثابة الشريان الحيوي لأي أمة، فهي تدعم التنمية الاقتصادية والاجتماعية وتوفر بيئة آمنة للمواطنين. في ليبيا، شهدت هذه البنية تدهوراً غير مسبوق على مدى العقود الماضية، نتيجة لتقاطع عوامل مدمرة تتمثل في النزاعات المسلحة المتكررة التي عصفت بالبلاد، إلى جانب تأثيرات تقادم الزمن وضعف الصيانة الدورية. لقد أدت هذه الظروف إلى انتشار واسع للتصدعات والتشققات في مختلف المنشآت، من المباني السكنية والمرافق العامة إلى الجسور والطرق، مما يثير مخاوف جدية بشأن السلامة الإنشائية ويفرض تحديات هائلة على جهود إعادة الإعمار والتنمية المستقبلية.

لقد تركت سنوات الصراع ندوباً عميقة على نسيج المجتمع الليبي وبنيته التحتية المادية. لم تقتصر الأضرار على التدمير المباشر جراء القصف والانفجارات، بل امتدت لتشمل التدهور البطيء الناتج عن الإهمال ونقص الموارد المخصصة للصيانة. هذا التراكم للأضرار يهدد استقرار الآلاف من المباني ويعرض حياة شاغليها للخطر، كما أنه يعرقل عجلة التنمية الاقتصادية ويعيق عودة الحياة الطبيعية للمتضررين.

تهدف هذه الورقة البحثية إلى تقديم رؤية هندسية متكاملة وشاملة لمعالجة التصدعات والتشققات في المنشآت المتضررة في ليبيا. ستركز الورقة على تحليل أنواع التصدعات وآليات حدوثها في السياق الليبي، ثم تستعرض منهجيات التشخيص الحديثة والفعالة، وتفصل في طرق المعالجة المتاحة، مع التركيز بشكل خاص على دور المواد المركبة (FRP) كحل مبتكر ومستدام. كما ستتناول التحديات الرئيسية التي تواجه عملية الترميم في ليبيا وتقدم توصيات عملية ومدروسة لضمان نجاح جهود إعادة الإعمار. سيعتمد هذا العمل على منهجيات علمية حديثة ودراسات سابقة لتوفير إطار عمل يمكن أن يساهم في تحسين الأداء الإنشائي للمباني وإطالة عمرها الافتراضي.

2. أنواع التصدعات والتشققات في المنشآت

تتعدد أنواع التصدعات التي تصيب المنشآت الخرسانية، وتختلف أسبابها وآلياتها، مما يستدعي فهمًا دقيقًا لكل نوع لتحديد طريقة المعالجة المناسبة. في السياق الليبي، تتفاقم هذه الأنواع بسبب الظروف الاستثنائية التي مرت بها البلاد. يمكن تصنيف التصدعات الرئيسية إلى الفئات التالية:

1.2. تصدعات ناتجة عن النزاعات المسلحة والحروب

تُعد التصدعات الناتجة عن الحروب تحديًا فريدًا ومعقدًا، حيث تختلف آليات حدوثها جذريًا عن تلك الناتجة عن التقادم الطبيعي أو الأخطاء الإنشائية التقليدية. في بيئة ما بعد الصراع، تتعرض المباني لهجمات مباشرة وغير مباشرة تترك آثارًا مدمرة على سلامتها الهيكلية.

1.1.2 الانفجارات والآثار التدميرية المباشرة

تعتبر الانفجارات، سواء كانت ناجمة عن الألغام، القذائف المدفعية، أو العبوات الناسفة، من أكثر المصادر تدميرًا للمنشآت. تنتج الانفجارات موجات صدمة شديدة تنتقل عبر الهواء والتربة والهياكل الخرسانية، مسببة ضغوطًا ديناميكية هائلة تفوق بكثير قدرة المواد على الاستجابة المرنة. هذه الضغوط تؤدي إلى:

- **شروخ الانفجار (Blast Cracks):** تتميز بانتشارها الشعاعي من نقطة التأثير، وغالبًا ما تكون واسعة وعميقة، وقد تؤدي إلى انفصال أجزاء كبيرة من الخرسانة (Spalling) وتطايرها.
- **انهيار العناصر الإنشائية:** في الحالات الشديدة، يمكن أن تؤدي موجات الصدمة إلى انهيار جزئي أو كلي للأعمدة، الكمرات، أو الجدران الحاملة، مما يؤثر على الاستقرار الكلي للمبنى وقد يؤدي إلى الانهيار التدريجي.
- **تكسر الخرسانة وتساقطها:** تتسبب قوة الانفجار في تفتيت الخرسانة وتساقطها، كاشفة التسليح الفولاذي (exposed steel reinforcement) وتعرضه للتآكل.
- **تلف التسليح:** قد تتعرض قضبان التسليح للالتواء، الانحناء، أو حتى القطع تحت تأثير القوى الانفجارية، مما يقلل بشكل كبير من قدرة العنصر على تحمل الأحمال.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- **تشوه الهياكل المعدنية :**في المنشآت ذات الإطارات المعدنية، يمكن أن تسبب الانفجارات تشوهات كبيرة في الأعضاء الفولاذية والوصلات.

2.1.2 الاهتزازات والآثار الثانوية

حتى المباني التي لم تتعرض لانفجارات مباشرة يمكن أن تتأثر بالاهتزازات الناجمة عن القصف الجوي، حركة الآليات الثقيلة، أو انهيار المباني المجاورة. هذه الاهتزازات المتكررة والمتذبذبة يمكن أن تؤدي إلى:

- **الشروخ الدقيقة :(Micro-cracks)** تظهر هذه الشروخ غالبًا في نقاط ضعف الهيكل، مثل الفتحات أو التقاء العناصر الإنشائية وغير الإنشائية، وقد تتطور بمرور الوقت إلى شروخ أكبر وأكثر خطورة.
- **فصل العناصر الإنشائية وغير الإنشائية :**يمكن أن تتسبب الاهتزازات المستمرة في فصل العناصر غير الإنشائية (مثل قواطع الجدران) عن الهيكل الرئيسي، مما يؤدي إلى ظهور شروخ عند نقاط الاتصال وفقدان الترابط.
- **فقدان التماسك :**قد تفقد مواد البناء تماسكها الداخلي بسبب الإجهادات المتكررة(Fatigue) ، مما يقلل من مقاومتها الكلية ويجعلها أكثر عرضة للانهيار.

3.1.2 الانهيارات الجزئية والتأثيرات المتسلسلة

عندما ينهار جزء من المبنى، سواء كان سقفًا، جدارًا، أو عمودًا، فإن ذلك يولد أحمالًا إضافية غير متوقعة على الأجزاء المتبقية من الهيكل. يمكن أن يؤدي هذا إلى:

- **إعادة توزيع الإجهادات :**تتغير مسارات نقل الأحمال داخل المبنى بشكل جذري، مما يسبب تركيزًا للإجهادات في مناطق لم تكن مصممة لتحملها.
- **الانهيار التدريجي :(Progressive Collapse)** في بعض الحالات، يمكن أن يؤدي انهيار جزء واحد إلى انهيار أجزاء أخرى بشكل متتابع، مما يهدد الاستقرار الكلي للمبنى ويجعله عرضة للانهيار الكامل.
- **الأضرار الثانوية :**قد تتسبب الأنقاض المتساقطة في إحداث أضرار إضافية في المستويات السفلية للمبنى، بما في ذلك تكسير البلاطات والأعمدة.

4.1.2 تداعيات أخرى مرتبطة بالحروب

بالإضافة إلى الأضرار المباشرة، يمكن أن تؤثر الظروف المرتبطة بالحروب بشكل غير مباشر على سلامة المنشآت:

- **الحرائق :**غالبًا ما تترافق النزاعات المسلحة مع الحرائق التي تؤثر بشكل كبير على خصائص الخرسانة (فقدان المقاومة) وقوة التسليح (فقدان الخضوع والشد).
- **نقص الصيانة والإهمال :**خلال فترات الصراع، تتوقف أعمال الصيانة الدورية، مما يسرع من تدهور المباني القائمة ويترك التصدعات تتفاقم دون علاج.
- **استخدام مواد غير مطابقة للمواصفات :**في بعض الأحيان، يتم استخدام مواد بناء رديئة أو غير مطابقة للمواصفات بسبب نقص الموارد، أو تعطيل سلاسل الإمداد، أو الظروف الأمنية، مما يقلل من جودة البناء ومقاومته الأولية.

2.2. تصدعات ناتجة عن تقادم الزمن وضعف الصيانة

تعتبر هذه الفئة من التصدعات الأكثر شيوعًا في المنشآت الخرسانية بشكل عام، وتتفاقم في ليبيا بسبب ضعف أنظمة الصيانة وقلة التحديث.

1.2.2 انكماش الخرسانة(Shrinkage Cracks)

- **الانكماش اللدن :(Plastic Shrinkage)** يحدث في الخرسانة الطازجة قبل تصلبها، نتيجة لتبخر الماء السريع من السطح العلوي، خاصة في الأجواء الحارة والجافة كما هو الحال في ليبيا. تظهر على شكل شروخ سطحية متقاطعة غير عميقة.
- **الانكماش الجاف :(Drying Shrinkage)** يحدث بعد تصلب الخرسانة نتيجة لفقدان الماء المتصلد مع مرور الوقت. هذه الشروخ تكون عادة عشوائية وقد تتغلغل بعمق أكبر، وتعتمد على محتوى الماء في الخلطة ونوع الركام ونسبة الأسمنت.

2.2.2 تآكل حديد التسليح(Corrosion of Reinforcement)

تُعد هذه المشكلة من أخطر أنواع التصدعات التي تهدد سلامة المنشآت الخرسانية في البيئات الساحلية والرطبة مثل ليبيا.

- **الآلية :**يبدأ تآكل الحديد عندما تتعرض طبقة الحماية القلوية حول التسليح للضرر بسبب اختراق غاز ثاني أكسيد الكربون (Carbonation) أو أيونات الكلوريد (Chloride Attack) من البيئة المحيطة. عند تآكل الحديد، يتكون الصدأ الذي يتميز بحجم أكبر بكثير من حجم الحديد الأصلي (يمكن أن يصل إلى 6 أضعاف)، مما يولد ضغوطًا داخلية هائلة على الخرسانة المحيطة.
- **النتائج :**تظهر هذه الضغوط على شكل شروخ طولية متوازية مع قضبان التسليح، وقد تؤدي إلى انفصال طبقات الخرسانة الخارجية (Spalling) وكشف الحديد، مما يسرع من عملية التآكل. هذه الشروخ غالبًا ما تكون حمراء اللون بسبب الصدأ المتسرب.

3.2.2 ضعف جودة الخرسانة والتنفيذ

- **نقص الدمك :(Compaction)** يؤدي نقص الدمك أثناء صب الخرسانة إلى وجود فراغات هوائية كبيرة (Voids)وضعف في التماسك، مما يقلل من مقاومتها الكلية ويزيد من نفاذيتها للمياه والعوامل الضارة.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

- **نسبة الماء/الأسمنت العالية (High Water/Cement Ratio):** تؤدي هذه النسبة إلى خرسانة ذات مسامية عالية وضعف في المقاومة، مما يجعلها أكثر عرضة للشروخ والتدهور.
- **استخدام مواد غير مطابقة:** استخدام ركام غير نظيف أو أسمنت رديء يمكن أن يقلل من جودة الخرسانة النهائية ويجعلها أكثر عرضة للشروخ.
- **معالجة غير كافية (Insufficient Curing):** عدم توفير الظروف المناسبة لمعالجة الخرسانة بعد الصب (خاصة في الأجواء الحارة) يؤدي إلى تبخر سريع للماء وظهور شروخ الانكماش الجاف.

3.2. تصدعات إنشائية(Structural Cracks)

تؤثر هذه التصدعات بشكل مباشر على قدرة التحمل الإنشائية للمبنى وتستدعي تدخلًا فوريًا.

1.3.2 زيادة الأحمال عن القدرة التصميمية

- **الآلية:** يحدث هذا النوع عندما تتعرض المنشأة لأحمال أكبر من تلك التي تم تصميمها لتحملها. قد يكون ذلك بسبب تغيير استخدام المبنى (مثل تحويل سكني إلى تجاري أو إضافة طوابق)، أو أحمال غير متوقعة (مثل الزلازل غير المصممة لها، أو تراكم الأنقاض نتيجة حرب).
- **النتائج:** تظهر الشروخ الإنحنائية (Flexural Cracks) في مناطق الشد للكمرات والبلاطات، والشروخ القصية (Shear Cracks)المائلة في الكمرات والجدران، وشروخ الضغط (Compression Cracks) في الأعمدة. هذه الشروخ غالبًا ما تكون عميقة وتتسع مع زيادة الحمل.

2.3.2 هبوط الأساسات التفاضلي(Differential Settlement)

- **الآلية:** يحدث عندما تهبط أجزاء مختلفة من الأساسات بمقادير متفاوتة، مما يولد إجهادات شد وقص غير متوقعة في الهيكل العلوي للمبنى. قد يكون السبب ضعف التربة في بعض المناطق، وجود فراغات تحت الأساسات، أو أخطاء في تصميم الأساسات.
- **النتائج:** تظهر شروخًا مائلة أو متدرجة في الجدران والأعمدة، غالبًا ما تكون على شكل حرف "V" أو"Z" ، وتكون أوسع في الأعلى أو الأسفل حسب اتجاه الهبوط. هذه الشروخ قد تؤدي إلى تشوه الإطارات وفقدان استقامتها.

3.3.2 عيوب التصميم أو التنفيذ الإنشائي

- **نقص التسليح:** عدم كفاية كمية التسليح في مناطق الشد أو القص، أو وضع التسليح في مواضع غير صحيحة، يقلل من قدرة العنصر على مقاومة الأحمال.
- **أبعاد غير كافية للعناصر الإنشائية:** تصميم أعمدة أو كمرات بأبعاد لا تتناسب مع الأحمال المتوقعة يؤدي إلى إجهادات عالية وظهور الشروخ.
- **أخطاء في الوصلات:** ضعف تنفيذ وصلات الأعمدة مع الكمرات أو الكمرات مع البلاطات يؤدي إلى فشل هذه الوصلات تحت الإجهادات.

4.2. تصدعات غير إنشائية(Non-Structural Cracks)

هذه التصدعات سطحية ولا تؤثر بشكل مباشر على قدرة التحمل الإنشائية للمبنى، لكنها قد تؤثر على جماليات المبنى ووظيفته (مثل تسرب المياه).

1.4.2 التقلبات الحرارية(Thermal Cracks)

- **الآلية:** تتمدد وتنكمش الخرسانة والمواد الأخرى (مثل الطوب والتشطيبات) مع تغير درجات الحرارة. إذا كانت هذه الحركة مقيدة، فإنها تولد إجهادات حرارية تؤدي إلى الشروخ. في ليبيا، التقلبات الكبيرة بين درجات حرارة النهار والليل والصيف والشتاء تساهم بشكل كبير في ظهور هذه الشروخ.
- **النتائج:** تظهر شروخًا عشوائية أو شبكية في طبقات التشطيب والجدران الخرسانية.

2.4.2 تفاعل المواد(Material Interaction)

- **الآلية:** يحدث عندما تكون هناك مواد بناء مختلفة ذات معاملات تمدد حراري أو خصائص انكماشية مختلفة متجاورة. على سبيل المثال، قد يحدث تباين بين الخرسانة والطوب أو بين طبقات الملاط والتشطيبات.
- **النتائج:** تظهر شروخًا على طول الحدود الفاصلة بين المواد المختلفة.

3.4.4 أخطاء التشطيبات

- **الآلية:** قد تكون بسبب ضعف جودة الملاط، أو التطبيق غير الصحيح لطبقات اللياسة، أو استخدام مواد تشطيبات غير مناسبة للظروف البيئية.
- **النتائج:** شروخ سطحية في طبقات اللياسة أو الدهانات، غالبًا ما تكون شبكية أو عشوائية ولا تتجاوز سمك طبقة التشطيب.

إن الفهم الدقيق لهذه التصنيفات وآليات حدوثها هو الخطوة الأولى والأساسية نحو تحديد منهجية التشخيص والعلاج الأنسب، خاصة في البيئات المعقدة والمتأثرة بالصراعات مثل ليبيا.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

3. منهجية التشخيص والتقييم الإنشائي

تُعد عملية التشخيص الدقيق هي حجر الزاوية في أي خطة ترميم ناجحة. فبدون فهم شامل لسبب التصدعات، ومداها، وتأثيرها على الأداء الإنشائي، قد تكون حلول المعالجة غير فعالة أو مؤقتة. في ليبيا، حيث تتداخل أضرار الحروب مع مشاكل التقادم، يجب أن تكون منهجية التشخيص متكاملة وتعتمد على مجموعة من الفحوصات والاختبارات.

1.3. الفحص البصري الأولي والتصنيف

تبدأ عملية التشخيص دائمًا بفحص بصري دقيق للمنشأة، يهدف إلى تحديد الأنماط العامة للتصدعات والتشققات وتصنيفها المبدئي.

- **المسح الشامل :**فحص جميع أجزاء المبنى، بما في ذلك الواجهات، الأسقف، الأرضيات، الأعمدة، الكمرات، والجدران، من الداخل والخارج.
- **توثيق الشروخ:**
  - **الموقع :**تحديد الموقع الدقيق لكل شرخ (مثال: في عمود الدور الأرضي، في منتصف كمرة الدور الأول، في زاوية الجدار).
  - **الاتجاه :**هل الشرخ أفقي، رأسي، مائل، أو شبكي؟ (مثال: شروخ مائلة بزاوية 45 درجة تدل على قص، شروخ طولية موازية للتسليح تدل على تآكل).
  - **الشكل والنمط :**هل هي شروخ منفردة، متوازية، متقاطعة، أو متشعبة؟
  - **الاتساع (العرض) :**تقدير عرض الشرخ بالملليمترات (مم). يمكن استخدام مقياس شروخ (Crack Gauge) لتقدير أكثر دقة.
  - **الطول :**قياس طول الشرخ.
  - **العمق :**تقدير مبدئي لعمق الشرخ، وهل يخترق العنصر الإنشائي؟
  - **اللون :**هل هناك أي تغير في اللون حول الشرخ (مثل بقع الصدأ الحمراء التي تدل على تآكل الحديد)؟
  - **نشاط الشرخ :**هل الشرخ نشط (يتسع بمرور الوقت) أم خامل (ثابت)؟ يمكن استخدام أقلام قياس الشروخ (Tell-Tales) أو مراقبة دورية لتحديد ذلك.
- **تسجيل الملاحظات :**توثيق جميع الملاحظات والصور والرسومات التخطيطية للمنشأة وتوزيع الشروخ عليها.
- **التصنيف المبدئي :**بناءً على الفحص البصري، يمكن للمهندس تصنيف الشروخ مبدئيًا إلى إنشائية أو غير إنشائية، وتحديد الأضرار الواضحة الناتجة عن الحروب (مثل ثقوب القذائف، تشوهات واضحة).

2.3. قياس الاتساع والأعماق بدقة

بعد الفحص البصري، تأتي مرحلة القياسات الدقيقة لتحديد خصائص الشروخ.

1.2.3. قياس اتساع الشروخ(Crack Width Measurement)

- **مقياس الشروخ :(Crack Gauge)** وهو عبارة عن بطاقة بلاستيكية شفافة تحتوي على خطوط ذات عروض مختلفة لمقارنتها بعرض الشرخ.
- **المجهر اليدوي :(Hand-held Microscope)** يوفر تكبيرًا أعلى وقدرة على قياس عرض الشرخ بدقة أكبر.
- **مراقبة الشروخ :(Crack Monitoring)** لتقييم نشاط الشرخ (هل يتسع، يضيق، أو ثابت)، يتم تركيب أجهزة قياس مثل أقلام الشروخ الميكانيكية (Mechanical Crack Meters) أو أجهزة استشعار إلكترونية تقيس التغيرات الدقيقة في العرض على فترات زمنية محددة. هذه المراقبة ضرورية لتحديد مدى خطورة الشرخ وتحديد أولويات المعالجة.

2.2.3. قياس عمق الشروخ (Crack Depth Measurement)

- **الفحص بالعين المجردة :**في الشروخ العميقة أو التي تخترق العنصر، يمكن ملاحظة ذلك.
- **النقر :(Tapping)** استخدام مطرقة صغيرة للنقر حول الشرخ، قد يشير صوت أجوف إلى وجود انفصال داخلي أو عمق كبير للشرخ.
- **جهاز الموجات فوق الصوتية :(Ultrasonic Pulse Velocity - UPV)** يمكن استخدامه لتقدير عمق الشروخ، حيث تتغير سرعة الموجة الصوتية عند عبورها لشرخ أو فراغ.
- **التصوير الحراري :(Thermography)** في بعض الحالات، يمكن أن يكشف عن الاختلافات الحرارية الناتجة عن وجود شروخ أو فراغات داخلية.

3.3. استخدام الأجهزة والاختبارات غير المدمرة(Non-Destructive Testing - NDT)

تُعد الاختبارات غير المدمرة أدوات حيوية لتقييم جودة الخرسانة والحديد دون إحداث ضرر كبير بالهيكل.

1.3.3. جهاز سرعة نبض الموجات فوق الصوتية(Ultrasonic Pulse Velocity - UPV)

- **مبدأ العمل :**يقيس الجهاز سرعة انتقال الموجات فوق الصوتية عبر الخرسانة. تتناسب سرعة الموجة طرديًا مع جودة الخرسانة وكثافتها ومقاومتها.
- **الاستخدامات:**
  - تقدير جودة الخرسانة: كلما زادت السرعة، دل ذلك على خرسانة ذات جودة أعلى ومقاومة أكبر.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

- الكشف عن الفراغات (Voids) والشروخ الداخلية: تشير السرعات المنخفضة أو انقطاع الموجة إلى وجود فراغات أو شروخ داخلية غير مرئية.
- تحديد مدى التلف: يمكن استخدامه لتقييم مدى تدهور الخرسانة بسبب الحريق أو العوامل الكيميائية.
- تقدير عمق الشرخ: كما ذكر سابقاً، يمكن للموجات أن تساعد في تحديد عمق الشروخ السطحية.

2.3.3 مطرقة الارتداد(Rebound Hammer - Schmidt Hammer)

- **مبدأ العمل :**تقيس هذه المطرقة صلادة السطح الخارجي للخرسانة عن طريق قياس ارتداد مطرقة معدنية صغيرة بعد ضربها لسطح الخرسانة.
- **الاستخدامات:**
  - تقدير المقاومة السطحية للخرسانة: يستخدم الجهاز لتقدير المقاومة التقريبية للخرسانة، ولكنها تعتبر قراءة سطحية وتتأثر بعوامل متعددة مثل نوع الركام ورطوبة السطح.
  - تحديد التجانس: يساعد في الكشف عن المناطق الضعيفة أو غير المتجانسة في الخرسانة.
  - تقييم الأضرار: يمكن استخدامه لتقييم الأضرار السطحية الناتجة عن الحريق أو التدهور.

3.3.3. جهاز مسح الحديد(Ferro Scan / Cover Meter)

- **مبدأ العمل :**يستخدم المجال المغناطيسي للكشف عن قضبان التسليح داخل الخرسانة.
- **الاستخدامات:**
  - تحديد موقع التسليح: يساعد في تحديد الموقع الدقيق لقضبان التسليح قبل إجراء أي حفريات أو ثقوب.
  - قياس سمك الغطاء الخرساني :(Concrete Cover) وهو سمك طبقة الخرسانة التي تغطي التسليح. يعد الغطاء الخرساني الكافي حاسمًا لحماية الحديد من التآكل.
  - تقدير قطر التسليح: بعض الأجهزة المتقدمة يمكنها تقدير قطر قضبان التسليح.
  - الكشف عن تآكل التسليح (محدود): يمكن لبعض الأجهزة أن تكشف عن وجود تآكل في التسليح من خلال الكشف عن التغيرات في الخصائص المغناطيسية، ولكن هذا يتطلب أجهزة أكثر تخصصًا (مثل Potentiostat).

4.3.3. اختبار نصف الخلية الكهربائية(Half-Cell Potential Test)

- **مبدأ العمل :**يقيس هذا الاختبار فرق الجهد الكهربائي بين قضبان التسليح والسطح الخارجي للخرسانة باستخدام قطب مرجعي (عادة كبريتات النحاس المشبعة).
- **الاستخدامات:**
  - تحديد احتمالية تآكل حديد التسليح: تشير قراءات الجهد السالبة العالية إلى احتمالية عالية لوجود تآكل في حديد التسليح، حتى قبل ظهور الشروخ السطحية.
  - تحديد المناطق النشطة للتآكل: يساعد في تحديد المناطق الأكثر عرضة للتآكل داخل الهيكل.

5.3.3. اختبارات أخرى غير مدمرة

- **الرادار المخترق للأرض :(Ground Penetrating Radar - GPR)** يستخدم للكشف عن التسليح، الفراغات، الأنابيب، والتدهور داخل الخرسانة على أعماق أكبر.
- **التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء :(Infrared Thermography)** للكشف عن التفاوتات الحرارية التي قد تدل على وجود عيوب داخلية أو تسرب مياه.

4.3. الاختبارات المدمرة(Destructive Testing)

في بعض الحالات، تكون الاختبارات المدمرة ضرورية للحصول على بيانات دقيقة حول خصائص المواد.

1.4.3 أخذ عينات الخرسانة(Core Drilling)

- **مبدأ العمل :**يتم قطع أسطوانات صغيرة من الخرسانة من الموقع باستخدام مثقاب خاص.
- **الاستخدامات:**
  - تحديد مقاومة الضغط: يتم اختبار العينات في المختبر لتحديد مقاومة الضغط الفعلية للخرسانة، والتي تعد المؤشر الأكثر دقة لجودتها.
  - التحليل الكيميائي: يمكن تحليل العينات لتحديد محتوى الكلوريدات، الكربنة، أو وجود مواد كيميائية ضارة أخرى.
  - التحليل المجهري: لدراسة التركيب المجهري للخرسانة والكشف عن العيوب.

2.4.3 اختبارات التسليح

- **أخذ عينات من حديد التسليح :**في حالات نادرة، قد يتم قطع عينات صغيرة من التسليح (مع مراعاة السلامة الإنشائية) لإجراء اختبارات الشد في المختبر لتحديد قوة الخضوع والشد الفعلية.
- **فحص التسليح المكشوف :**فحص بصري دقيق للتسليح المكشوف لتقييم مدى التآكل وفقدان المقطع العرضي.

5.3. تحليل سبب الشرخ وتقييم تأثيره على النظام الإنشائي

بعد جمع جميع البيانات من الفحص والاختبارات، تأتي المرحلة الأكثر أهمية: تحليل البيانات وتفسيرها.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- **تحليل الأسباب الجذرية :**يجب على المهندس تحليل جميع البيانات لتحديد السبب أو الأسباب الجذرية لظهور التصدعات (هل هي أحمال زائدة، تآكل حديد، هبوط أساسات، أضرار حرب، أو مزيج من هذه العوامل؟).
- **تقييم الأثر الإنشائي:**
  - تأثير الشرخ على سعة الحمل: هل الشرخ يقلل من قدرة العنصر الإنشائي على تحمل الأحمال المحورية، القص، أو العزوم؟
  - سلامة الهيكل الكلي: هل الشروخ تهدد الاستقرار العام للمبنى أو قد تؤدي إلى انهيار تدريجي؟
  - تقييم المخاطر: تحديد مستوى الخطر الذي تشكله التصدعات على شاغلي المبنى والممتلكات.
- **النمذجة والتحليل الإنشائي :**في الحالات المعقدة، قد يتم استخدام برامج التحليل الإنشائي (مثل SAP2000, ETABS) لنمذجة المبنى وتقييم سلوكه تحت الأحمال المختلفة، مع الأخذ في الاعتبار الأضرار المكتشفة. يمكن إعادة تحليل المبنى بخصائص المواد المخفضة لتقييم القدرة المتبقية للهيكل.
- **إعداد تقرير التشخيص :**يجب إعداد تقرير شامل يتضمن جميع الملاحظات، نتائج الاختبارات، تحليل الأسباب، وتقييم الأثر الإنشائي، بالإضافة إلى التوصيات المبدئية للمعالجة.

إن منهجية التشخيص المتكاملة هذه تضمن اتخاذ قرارات مستنيرة وفعالة بشأن ترميم المنشآت المتضررة، وتعد خطوة أساسية نحو استعادة سلامة وقوة البنية التحتية في ليبيا.

4. طرق المعالجة والإصلاح

بعد إجراء التشخيص الدقيق وتحديد الأسباب الجذرية للتصدعات ومدى تأثيرها على المنشأة، يتم اختيار طرق المعالجة المناسبة. يجب أن تكون هذه الطرق شاملة وتراعي الظروف البيئية والإنشائية والاقتصادية في ليبيا.

1.4. معالجة الشروخ السطحية(Surface Cracks)

تُعد الشروخ السطحية غير الإنشائية سهلة المعالجة نسبيًا ولكنها مهمة لمنع تسرب المياه وحماية العناصر الإنشائية من التدهور المستقبلي.

- **المونة الإسمنتية المعدلة بالبوليمرات:(Polymer Modified Cement Mortar)**
  - الاستخدام: تستخدم للشروخ الصغيرة والسطحية التي لا يتجاوز عرضها 0.2 مم.
  - الآلية: يتم تنظيف الشرخ جيدًا من الأتربة والمواد السائبة، ثم يتم تطبيق المونة المعدلة بالبوليمرات التي توفر التصاقًا أفضل ومرونة أعلى ومقاومة للماء مقارنة بالمونة الإسمنتية العادية. يمكن استخدام مواد لاصقة إسمنتية خاصة.
  - المزايا: فعالة من حيث التكلفة، سهلة التطبيق، وتوفر حماية جيدة.
- **البوليمرات المرنة:(Flexible Polymer Sealants)**
  - الاستخدام: للشروخ السطحية التي قد تكون عرضة للحركة الطفيفة أو التقلبات الحرارية، أو في مناطق تعرض المبنى لتسرب المياه.
  - الآلية: يتم توسيع الشرخ قليلًا على شكل حرف "V" أو"U" ، وتنظيفه، ثم ملئه بمادة بوليمرية مرنة مثل السيليكون أو البولي يوريثين (Polyurethane) أو الإيبوكسي المرن. هذه المواد تسمح بحركة محدودة للشرخ دون إعادة فتحه.
  - المزايا: توفر مرونة عالية، مقاومة للماء، ومناسبة للظروف البيئية المتغيرة.

2.4. حقن الإيبوكسي للشروخ المتوسطة(Epoxy Injection for Moderate Cracks)

تعتبر هذه الطريقة فعالة جدًا لإعادة الترابط بين أجزاء الخرسانة المتصدعة واستعادة المقاومة الإنشائية.

- **الاستخدام :**للشروخ ذات العرض المتوسط (من 0.2 مم إلى 5 مم)، خاصة تلك التي تخترق العنصر الإنشائي وتؤثر على قدرة التحمل.
- **الآلية:**

1. التنظيف: يتم تنظيف الشرخ جيدًا من الأتربة والمواد السائبة.
2. تثبيت الفوهات :(Ports) يتم تثبيت فوهات حقن صغيرة على طول الشرخ بمسافات منتظمة (عادة 20-30 سم).
3. إغلاق السطح: يتم إغلاق سطح الشرخ بمادة إيبوكسي سريعة الجفاف أو ملاط إسمنتي لمنع تسرب مادة الحقن.
4. الحقن: يتم حقن مادة الإيبوكسي من أدنى فوهة (في الشروخ الرأسية) أو من أحد الأطراف (في الشروخ الأفقية) تحت ضغط منخفض. يستمر الحقن حتى تظهر المادة من الفوهة التالية، ثم يتم إغلاق الفوهة الأولى والانتقال للثانية وهكذا.
5. المعالجة: تترك مادة الإيبوكسي لتتصلب وتلتصق بالخرسانة.

- **المزايا :**تستعيد المقاومة الأصلية للخرسانة، توفر ترابطًا قويًا ومقاومة للمياه، وتعد حلاً دائمًا للشروخ الإنشائية.
- **التحديات :**تتطلب خبرة فنية ومعدات خاصة، وقد تكون غير فعالة في الشروخ الضيقة جدًا أو الملوثة بالماء.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

3.4. معالجة الشروخ العميقة والواسعة

عندما تكون الشروخ واسعة جدًا (أكبر من 5 مم) أو عميقة وتؤثر بشكل كبير على سلامة الهيكل، تتطلب طرق معالجة أكثر قوة.

1.3.4. المونة غير المنكمشة(Non-Shrink Grout)

- **الاستخدام :**لملء الشروخ والفتحات الكبيرة، أو لترميم المناطق المتضررة بشدة.
- **الآلية :**يتم توسيع الشرخ أو المنطقة المتضررة وتنظيفها جيدًا، ثم ملئها بمونة إسمنتية خاصة تتميز بأنها لا تنكمش بعد التجمد، بل قد تتمدد قليلاً لضمان ملء كامل الفراغات وتوفير ترابط جيد مع الخرسانة القديمة.
- **المزايا :**تملأ الفراغات بشكل فعال، توفر مقاومة جيدة للضغط، وتمنع تكون شروخ انكماش جديدة.

2.3.4. القميص الخرساني(Concrete Jacketing)

- **الاستخدام :**لتدعيم الأعمدة، الكمرات، والجدران التي فقدت جزءًا كبيرًا من قدرتها على التحمل بسبب الشروخ العميقة أو التآكل أو الأضرار الناجمة عن الحروب.
- **الآلية :**تتضمن زيادة المقطع العرضي للعنصر الإنشائي بإضافة طبقة جديدة من الخرسانة المسلحة حول العنصر القديم. يتم أولاً تحضير سطح العنصر القديم (إزالة الخرسانة التالفة، تنظيف التسليح)، ثم يتم زراعة أسياخ تسليح جديدة لربط الطبقة الجديدة بالقديمة، ثم يتم صب الخرسانة الجديدة.
- **المزايا :**تزيد بشكل كبير من سعة الحمل، المتانة، ومقاومة العنصر الإنشائي.
- **التحديات :**تتطلب مساحة عمل كبيرة، وقتًا أطول للتنفيذ، وتزيد من أبعاد العنصر ووزنه.

3.3.4. القميص الفولاذي(Steel Jacketing)

- **الاستخدام :**بديل للقميص الخرساني لتدعيم الأعمدة والكمرات، خاصة عندما تكون المساحة محدودة.
- **الآلية :**يتم تغليف العنصر الإنشائي بألواح أو صفائح فولاذية تُثبت بمسامير كيميائية أو لحام، ثم يتم حقن الفراغ بين العنصر والقميص بمونة غير منكمشة أو راتنج إيبوكسي.
- **المزايا :**يوفر زيادة كبيرة في المقاومة بزيادة طفيفة في الأبعاد، سرعة في التنفيذ مقارنة بالقميص الخرساني.
- **التحديات :**التكلفة أعلى، يتطلب عمالة متخصصة في اللحام والتركيب، وقد يحتاج إلى حماية ضد الحريق والتآكل.

4.4. استخدام المواد المركبة (FRP) للتدعيم(FRP Composites for Strengthening)

تُعد المواد المركبة من أبرز الوسائل الحديثة والفعالة في تقوية العناصر الخرسانية المتضررة، وقد أثبتت كفاءتها العالية في ترميم المنشآت المتضررة بالحروب.

- **الاستخدام :**لزيادة مقاومة الأعمدة للضغط والحبس(Confinement) ، وزيادة مقاومة الكمرات والبلاطات للانحناء والقص، وتدعيم الجدران.
- **الآلية :**يتم لصق ألياف البوليمرات المقواة (FRP) على سطح العنصر الخرساني باستخدام راتنج إيبوكسي خاص. تأتي FRP على شكل شرائح أو أقمشة رقيقة جدًا.
- **المزايا (سيتم تفصيلها في قسم لاحق) :**قوة شد عالية جدًا، وزن خفيف جدًا، مقاومة ممتازة للتآكل، سرعة وسهولة في التركيب، مرونة في التطبيق، لا تغير الأبعاد المعمارية بشكل كبير.
- **التحديات :**التكلفة الأولية قد تكون مرتفعة، تتطلب خبرة فنية عالية في التصميم والتطبيق، حساسية لدرجات الحرارة العالية (الحريق)، تحتاج لحماية من الأشعة فوق البنفسجية.

5.4. معالجة التصدعات الناتجة عن صدأ الحديد

تتطلب هذه المشكلة معالجة جذرية لإزالة مصدر المشكلة وليس مجرد إصلاح الشروخ.

- **الآلية:**

1. **تقشير الخرسانة :(Chipping)** يتم إزالة طبقات الخرسانة المتضررة والمتصدعة حول حديد التسليح حتى يتم كشف التسليح بالكامل وتنظيفه. يجب إزالة جميع الخرسانة التي تبدو متضررة أو ضعيفة.
2. **تنظيف الحديد :(Cleaning of Reinforcement)** يتم تنظيف حديد التسليح جيدًا من جميع الصدأ باستخدام فرشاة سلكية، الصنفرة، أو حتى السفع الرملي (Sand Blasting) في الحالات الشديدة، لضمان سطح نظيف خالٍ من الأكسدة.
3. **معالجة الحديد :(Corrosion Protection)** بعد التنظيف، يتم تطبيق طبقة من المواد المانعة للصدأ على قضبان التسليح المكشوفة (مثل طلاء الإيبوكسي الغني بالزنك) لحمايته من التآكل المستقبلي.
4. **إضافة تسليح جديد (إن لزم) :**إذا فقد حديد التسليح جزءًا كبيرًا من مقطعه العرضي بسبب التآكل، يتم إضافة قضبان تسليح جديدة لتعويض النقص.
5. **إعادة الصب :(Re-concreting)** يتم إعادة صب المنطقة بالخرسانة الجديدة أو المونة الإسمنتية ذات المقاومة العالية والمحتوية على إضافات مقاومة للكلوريدات والكربنة. يجب أن تكون الخرسانة الجديدة ذات جودة عالية وأن توفر غطاءً خرسانيًا كافيًا.

- **المزايا :**تعالج السبب الجذري للتصدعات، تستعيد سلامة العنصر الإنشائي، وتزيد من عمر المنشأة.
- **التحديات :**عملية مكلفة وتستغرق وقتًا طويلًا، وتتطلب عمالة مدربة.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

6.4. معالجة التصدعات الناتجة عن هبوط الأساسات

تُعد هذه المشكلة معقدة وتتطلب معالجة الأساسات والتربة لدعم الهيكل.

1.6.4. تحسين خواص التربة(Soil Improvement)

- **الاستخدام :**عندما يكون الهبوط ناتجًا عن ضعف في قدرة تحمل التربة أو وجود فراغات.
- **الآلية :**يمكن حقن التربة بمواد كيميائية (Grouting) لزيادة كثافتها ومقاومتها، أو استخدام تقنيات الدمك (Compaction)أو استبدال جزء من التربة الضعيفة.
- **المزايا :**يحل المشكلة من جذورها، ويوفر أساسًا أكثر استقرارًا.
- **التحديات :**مكلفة، تتطلب دراسات جيوتقنية دقيقة، وقد تكون معقدة في التنفيذ.

2.6.4. تدعيم الأساسات(Underpinning of Foundations)

- **الاستخدام :**عندما يكون الهبوط كبيرًا أو ناتجًا عن ضعف في تصميم الأساسات.
- **الآلية:**

1. **إضافة أساسات جديدة :**يمكن إضافة قواعد جديدة أو خوازيق (Piles) تحت الأساسات القائمة لنقل الأحمال إلى طبقات تربة أعمق وأكثر قدرة على التحمل.
2. **توسيع الأساسات :**توسيع مساحة الأساسات القائمة لتقليل الإجهادات على التربة.
3. **حقن الأساسات :**حقن الأساسات بمواد تزيد من مقاومتها أو تملأ الفراغات تحتها.

- **المزايا :**توفر حلاً دائمًا لمشكلة الهبوط وتستعيد استقرار المبنى.
- **التحديات :**عملية معقدة، مكلفة، وتتطلب تخطيطًا دقيقًا وتنفيذًا متخصصًا.

تتطلب جميع طرق المعالجة هذه تقييمًا هندسيًا دقيقًا، واختيارًا للمواد المناسبة، وتنفيذًا عالي الجودة لضمان فعالية الإصلاح وطول عمر المنشأة. في سياق ليبيا، يجب أن يؤخذ في الاعتبار توفر المواد، الخبرات المحلية، والقيود اللوجستية عند اختيار وتنفيذ هذه الحلول.

5. دور المواد المركبة المقواة بالألياف (FRP) في تدعيم المنشآت

تُعد المواد المركبة المقواة بالألياف (Fiber Reinforced Polymers - FRP) ثورة حقيقية في مجال ترميم وتدعيم المنشآت الخرسانية، وتقدم حلاً مثاليًا للعديد من التحديات التي تواجه ليبيا في إعادة إعمار بنيتها التحتية المتضررة. تتكون هذه المواد من ألياف عالية القوة (مثل ألياف الكربون، الزجاج، أو الأراميد) مدمجة في مصفوفة بوليمرية (راتنج إيبوكسي عادة).

1.5. خصائص المواد المركبة (FRP) ومزاياها

تبرز المواد المركبة FRP كخيار مفضل لتدعيم المنشآت، وذلك لخصائصها الفريدة ومزاياها المتعددة:

1.1.5. قوة شد عالية جدًا(High Tensile Strength)

- تتمتع ألياف الكربون (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP) بشكل خاص بقوة شد تفوق بكثير قوة الفولاذ، مما يسمح لها بتحمل إجهادات شد هائلة وتوفير تعزيز كبير للعناصر الخرسانية.
- التطبيق: تُستخدم لزيادة مقاومة الانحناء في الكمرات والبلاطات، وزيادة مقاومة القص في الكمرات والأعمدة، وتوفير حبس فعال للأعمدة (Confinement) لزيادة مقاومتها للضغط وقابليتها للمطيلية.

2.1.5. وزن خفيف(Lightweight)

- تزن المواد المركبة FRP جزءًا صغيرًا من وزن الفولاذ أو الخرسانة التقليدية.
- التطبيق: هذا يجعلها سهلة المناولة والتركيب، ولا تزيد بشكل كبير من الأحمال الميتة على الهيكل، وهو أمر حاسم في المنشآت المتضررة حيث قد تكون قدرة التحمل محدودة. كما يقلل من تكاليف النقل والعمالة.

3.1.5. مقاومة ممتازة للتآكل(Excellent Corrosion Resistance)

- على عكس الفولاذ، لا تتآكل المواد المركبة FRP عند تعرضها للماء، الكلوريدات، أو المواد الكيميائية العدوانية.
- التطبيق: هذا يجعلها مثالية للاستخدام في البيئات الساحلية الليبية حيث تكون مشكلة تآكل حديد التسليح حادة، وتوفر حلاً دائمًا لا يتطلب صيانة مستمرة ضد الصدأ.

4.1.5 سرعة وسهولة التركيب(Speed and Ease of Installation)

- تأتي ألياف FRP على شكل أقمشة أو شرائح يمكن قصها وتشكيلها بسهولة في الموقع، ثم لصقها بالراتنج الإيبوكسي.
- التطبيق: هذا يقلل بشكل كبير من وقت التنفيذ مقارنة بالطرق التقليدية مثل القمصان الخرسانية أو الفولاذية، ويقلل من الاضطرابات في استخدام المبنى. كما أنها لا تتطلب معدات ثقيلة أو عمالة ذات مهارات خاصة جدًا في بعض التطبيقات البسيطة.

5.1.5. مرونة في التطبيق(Versatility in Application)

- يمكن تطبيق FRP على مجموعة واسعة من الأشكال والأسطح، بما في ذلك الأعمدة الدائرية والمربعة، الكمرات، البلاطات، والجدران.
- التطبيق: يتيح ذلك للمهندسين حلولًا مخصصة لتدعيم أجزاء مختلفة من الهيكل بفعالية.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

6.1.5. لا تغير الأبعاد المعمارية بشكل كبير(Minimal Architectural Impact)

- تُضاف FRP كطبقات رقيقة جدًا على سطح العنصر الإنشائي، مما لا يغير الأبعاد المعمارية أو المساحات الداخلية بشكل ملحوظ.
- التطبيق: هذا يحافظ على القيمة الجمالية والوظيفية للمبنى، وهو أمر مهم للمباني التاريخية أو التي تحتاج إلى إعادة تأهيل دون تغيير جوهري.

7.1.6 زيادة المتانة وعمر الخدمة(Increased Durability and Service Life)

- بفضل مقاومتها للتآكل وقوتها العالية، تساهم FRP في زيادة متانة الهياكل الخرسانية وإطالة عمر خدمتها بشكل كبير.

2.5. تطبيقات FRP في تدعيم المنشآت المتضررة بالحروب

تُعد FRP أداة قيمة بشكل خاص في ترميم المنشآت المتضررة من الحروب في ليبيا، حيث توفر حلولًا سريعة وفعالة لمجموعة واسعة من الأضرار:

1.2.5. تدعيم الأعمدة(Column Strengthening)

- **زيادة مقاومة الضغط والحبس :(Confinement)** يتم لف أقمشة FRP حول الأعمدة لزيادة مقاومتها للضغط وتحسين قابليتها للمطيلية(Ductility) ، مما يجعلها أكثر مقاومة للأحمال الزائدة أو الصدمات المستقبلية.
- **ترميم الأعمدة المتضررة :**في الأعمدة التي تعرضت لشروخ أو انفصال في الخرسانة بسبب الانفجارات أو الأحمال الزائدة، يمكن لـ FRP أن يعيد تماسكها ويزيد من قدرتها على تحمل الأحمال المحورية.

2.2.5. تدعيم الكمرات(Beam Strengthening)

- **زيادة مقاومة الانحناء :(Flexural Strengthening)** يتم لصق شرائح FRP على السطح السفلي للكمرات لزيادة مقاومتها لعزوم الانحناء.
- **زيادة مقاومة القص :(Shear Strengthening)** يتم لصق أقمشة FRP على جانبي الكمرات على شكل شرائط رأسية أو حرف U لزيادة مقاومتها لقوى القص. هذا مهم للكمرات التي تعرضت لشروخ قص مائلة.
- **ترميم الكمرات المتضررة :**يمكن لـ FRP أن يعالج الشروخ الناتجة عن الأحمال الزائدة أو تأثيرات الانفجار، ويستعيد القدرة الإنشائية للكمرة.

3.2.5. تدعيم البلاطات والأسقف(Slab and Roof Strengthening)

- **زيادة مقاومة الانحناء :**يتم لصق شرائح FRP على السطح السفلي للبلاطات لزيادة قدرتها على تحمل أحمال الانحناء، وهو أمر ضروري إذا كانت البلاطات قد تعرضت لشروخ أو تشوه.
- **تقوية الفتحات :**يمكن استخدام FRP لتقوية البلاطات حول الفتحات الجديدة أو التي تعرضت لأضرار.

4.2.5. تدعيم الجدران(Wall Strengthening)

- **زيادة مقاومة القص والجدران الحاملة :**يمكن لصق أقمشة FRP على أسطح الجدران لزيادة مقاومتها لقوى القص وتحسين أدائها كعناصر مقاومة للزلازل أو الصدمات.
- **ترميم الجدران المتصدعة :**تُستخدم FRP لإعادة تماسك الجدران المتصدعة وتعزيز قدرتها على حمل الأحمال.

3.5. دراسات الجدوى والتطبيق في البيئات المتضررة

لقد أثبتت الدراسات والأبحاث فعالية المواد المركبة FRP في ترميم المباني المتضررة بالحروب والكوارث الطبيعية في مختلف أنحاء العالم. في البيئات التي تعاني من نقص المعدات الثقيلة، البنية التحتية المتضررة، وصعوبة الوصول، تقدم FRPحلاً عمليًا بسبب:

- **سهولة النقل والتخزين :**المواد خفيفة ويمكن نقلها بسهولة إلى المواقع المتضررة.
- **الحد الأدنى من تعطيل الموقع :**التركيب السريع يقلل من فترة إغلاق المبنى أو تعطيل الحياة اليومية.
- **العمالة المحدودة :**تتطلب فرق عمل أصغر حجمًا وأقل عددًا مقارنة ببعض الطرق التقليدية.
- **التكيف مع الظروف :**يمكن تطبيقها في ظروف ميدانية صعبة.

في سياق ليبيا، حيث الحاجة الملحة لإعادة الإعمار والقيود اللوجستية، تُقدم FRP حلاً مبتكرًا وفعالًا لضمان استعادة السلامة الإنشائية للمباني بسرعة وكفاءة، والمساهمة في بناء بنية تحتية أكثر مرونة ومقاومة للمستقبل. ومع ذلك، يجب أن يتم تطبيقها بواسطة مهندسين وفنيين مؤهلين لضمان التصميم الصحيح والتنفيذ المطابق للمواصفات.

6. التحديات التي تواجه معالجة التصدعات في ليبيا

على الرغم من توفر التقنيات الهندسية المتقدمة لمعالجة التصدعات، تواجه ليبيا مجموعة من التحديات المعقدة التي قد تعيق جهود الترميم وإعادة الإعمار. هذه التحديات متجذرة في الوضع السياسي والاجتماعي والاقتصادي الذي شهدته البلاد على مدى عقود.

1.6. ضعف أنظمة الصيانة والتخطيط الحضري

- **ثقافة الصيانة الوقائية :**غياب ثقافة الصيانة الوقائية الدورية للمباني والمنشآت على المستويين الحكومي والخاص. غالبًا ما يتم التدخل فقط بعد تفاقم المشكلة وظهور أضرار واضحة.
- **نقص الميزانيات :**عدم تخصيص ميزانيات كافية للصيانة الدورية، مما يؤدي إلى تراكم الأضرار وتدهور سريع للمنشآت.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

- **غياب الخطط الإستراتيجية :**عدم وجود خطط إستراتيجية طويلة المدى لإدارة وصيانة الأصول الإنشائية، مما يؤدي إلى ردود أفعال بدلًا من نهج استباقي.
- **الفساد الإداري :**قد يؤدي الفساد الإداري إلى هدر الموارد المخصصة للصيانة أو استخدامها بطرق غير فعالة.

2.6. تفاوت جودة التنفيذ وضعف الرقابة على المشاريع

- **نقص الخبرات :**ضعف الخبرات لدى بعض المقاولين والعمال في تطبيق أفضل الممارسات الإنشائية ومعايير الجودة العالمية.
- **استخدام مواد رديئة :**الميل لاستخدام مواد بناء رديئة أو غير مطابقة للمواصفات لخفض التكاليف، مما يؤثر سلبًا على متانة المباني وقدرتها على مقاومة التدهور.
- **ضعف أنظمة الرقابة :**غياب أنظمة رقابة صارمة وفعالة من الجهات الحكومية والهندسية على مراحل التصميم والتنفيذ للمشاريع الجديدة، مما يسمح بحدوث الأخطاء الإنشائية.
- **غياب تطبيق الأكواد :**عدم الالتزام الكامل بالأكواد والمعايير الهندسية المحلية والدولية في التصميم والتنفيذ.

3.6. تأثير الظروف المناخية القاسية والبيئة العدوانية

- **درجات الحرارة المرتفعة :**تؤدي درجات الحرارة العالية في ليبيا إلى تبخر سريع لماء الخلطة الخرسانية وظهور شروخ الانكماش اللدن والجاف، كما تزيد من سرعة التفاعلات الكيميائية الضارة.
- **الرطوبة العالية والملوحة :**في المناطق الساحلية، تتسبب الرطوبة العالية ووجود أيونات الكلوريد (من مياه البحر) في تسريع عملية تآكل حديد التسليح وتدهور الخرسانة.
- **تغيرات درجات الحرارة :(Thermal Cycling)** الاختلافات الكبيرة بين درجات الحرارة اليومية والموسمية تؤدي إلى إجهادات حرارية متكررة تسبب الشروخ في الخرسانة ومواد التشطيب.
- **العواصف الرملية :**يمكن أن تسبب العواصف الرملية تآكلًا ميكانيكيًا لأسطح المباني على المدى الطويل.

4.6. نقص الخبرات المتخصصة في تطبيق التقنيات الحديثة (خاصة)FRP

- **نقص التدريب :**قلة الدورات التدريبية وورش العمل المتخصصة في تقنيات تدعيم FRP للمهندسين والفنيين المحليين.
- **غياب المؤسسات البحثية :**ضعف دور المؤسسات البحثية والجامعات في إجراء الدراسات التطبيقية ونشر المعرفة حول هذه التقنيات.
- **التكلفة الأولية :**قد تكون التكلفة الأولية للمواد المركبة FRP أعلى من بعض الطرق التقليدية، مما يجعل بعض المقاولين يترددون في استخدامها.
- **المواصفات المحلية :**عدم وجود مواصفات وأكواد ليبية محلية واضحة لتصميم وتطبيقFRP ، مما قد يؤدي إلى الاعتماد الكلي على الأكواد الأجنبية التي قد لا تتناسب تمامًا مع الظروف المحلية.

5.6. الأضرار الواسعة في بعض المدن نتيجة النزاعات المسلحة

- **حجم الدمار :**بعض المدن الليبية، مثل بنغازي ودرنة وسرت، شهدت دمارًا واسع النطاق للمباني والبنية التحتية، مما يتطلب جهود إعادة إعمار ضخمة تتجاوز قدرات الموارد المحلية الحالية.
- **الألغام والمتفجرات :**بقايا الألغام والمتفجرات غير المنفجرة تشكل خطرًا كبيرًا على فرق العمل وتعيق الوصول إلى بعض المناطق المتضررة.
- **الوضع الأمني :**التحديات الأمنية المستمرة في بعض المناطق قد تجعل من الصعب تنفيذ مشاريع الترميم على نطاق واسع.
- **نزوح السكان :**نزوح أعداد كبيرة من السكان يزيد من تعقيد عملية إعادة الإعمار، حيث يجب توفير مساكن مؤقتة أو دائمة لهم.

6.6. القيود الاقتصادية والتمويل

- **نقص التمويل :**الحاجة إلى استثمارات ضخمة في مشاريع الترميم وإعادة الإعمار، في ظل محدودية الميزانيات الحكومية والاحتياجات الملحة الأخرى.
- **الاعتماد على المساعدات الخارجية :**قد تضطر ليبيا إلى الاعتماد على المساعدات الخارجية والمنظمات الدولية لتمويل جزء من هذه المشاريع، مما قد يأتي بشروط معينة.
- **تقلبات أسعار النفط :**يعتمد الاقتصاد الليبي بشكل كبير على عائدات النفط، وأي تقلبات في أسعار النفط تؤثر على القدرة المالية للدولة.

إن التغلب على هذه التحديات يتطلب نهجًا متعدد الأوجه يشمل الإصلاحات الإدارية، بناء القدرات المحلية، الاستثمار في البحث والتطوير، وتوحيد الجهود بين القطاعات الحكومية والخاصة والمجتمع المدني.

الخاتمة

لقد أوضحت هذه الورقة البحثية أن ظاهرة التصدعات والتشققات في المنشآت الليبية هي نتيجة لتفاعل معقد بين عوامل متعددة، أبرزها الدمار الذي خلفته النزاعات المسلحة، وتأثيرات تقادم الزمن، وضعف أنظمة الصيانة. إن التهديد الذي تشكله هذه التصدعات على السلامة الإنشائية، وبالتالي على الأرواح والممتلكات، يتطلب استجابة هندسية شاملة ومدروسة.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

لقد استعرضنا أنواع التصدعات المختلفة، بدءًا من الأضرار المباشرة للانفجارات والاهتزازات، مرورًا بتأثيرات الانكماش والتآكل وهبوط الأساسات، وصولًا إلى الشروخ غير الإنشائية. وأكدنا على أهمية منهجية التشخيص الدقيق التي تجمع بين الفحص البصري، والاختبارات غير المدمرة (مثلUPV ، Rebound Hammer، Ferro Scan، Half-Cell Potential Test، GPR)، والاختبارات المدمرة (مثل أخذ عينات الخرسانة)، وذلك لضمان فهم شامل لأسباب ومدى التدهور.

كما قدمنا استعراضًا مفصلًا لطرق المعالجة، من أبسطها للشروخ السطحية باستخدام المونة والبوليمرات، إلى الأساليب المتقدمة مثل حقن الإيبوكسي، استخدام المونة غير المنكمشة، القمصان الخرسانية والفولاذية، ومعالجة صدأ الحديد وهبوط الأساسات. وقد أبرزنا الدور المحوري للمواد المركبة المقواة بالألياف (FRP) كحل مبتكر وفعال، يتميز بقوة شد عالية، خفة الوزن، مقاومة التآكل، وسهولة وسرعة التركيب، مما يجعله خيارًا مثاليًا للبيئة الليبية التي تعاني من تحديات لوجستية وتقنية.

ومع ذلك، فإن تحقيق هذه الرؤية الهندسية المتكاملة في ليبيا لا يخلو من التحديات الجسيمة، بما في ذلك ضعف أنظمة الصيانة، تفاوت جودة التنفيذ، تأثير الظروف المناخية القاسية، نقص الخبرات المتخصصة في التقنيات الحديثة، حجم الدمار الهائل في المدن المتضررة، والقيود الاقتصادية.

إن معالجة التصدعات في ليبيا ليست مجرد قضية هندسية بحتة، بل هي جزء لا يتجزأ من عملية أوسع لإعادة الإعمار الوطني، تتطلب تضافر الجهود على جميع المستويات لتحقيق الاستقرار والأمان للمواطنين.

التوصيات

بناءً على التحليل الشامل الذي قدمته هذه الورقة، نوصي بما يلي لتعزيز جهود معالجة التصدعات وإعادة إعمار البنية التحتية في ليبيا:

1. وضع إستراتيجية وطنية لإدارة الأصول الإنشائية.
2. تطوير القدرات البشرية والتدريب المتخصص.
3. تطبيق الأكواد والمعايير الهندسية المحلية والدولية.
4. تعزيز البحث العلمي والتطوير.
5. توفير الدعم المادي والتشريعي.
6. التركيز على الحلول المستدامة والمرنة.
7. توعية الجمهور بأهمية الصيانة.

المراجع

1. ACI Committee 224. (2017). *Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures* (ACI 224R-01). American Concrete Institute.
2. ACI Committee 440. (2015). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures* (ACI 440.2R-17). American Concrete Institute.
3. fib Bulletin 14. (2001). *FRP reinforcement in RC structures*. Fédération Internationale du Béton.
4. fib Bulletin 90. (2019). *FRP strengthening of RC structures*. Fédération Internationale du Béton.
5. Taly, N. (2011). *Bridge rehabilitation and replacement: A guide for state and local officials*. John Wiley & Sons.
6. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
7. Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education.
8. ACI Committee 362. (2004). *Guide for the assessment of concrete structures affected by fire* (ACI 362.1R-97 / Reapproved 2004). American Concrete Institute.
9. ACI Committee 546. (2004). *Guide for repair of concrete structures* (ACI 546R-04). American Concrete Institute.
10. ISO 19338:2014. (2014). *Performance evaluation of concrete repair materials and systems*. International Organization for Standardization.
11. BS EN 1504 Series. (2004). *Products and systems for the protection and repair of concrete structures: Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity*. British Standards Institution / European Committee for Standardization.
12. Malhotra, V. M., & Carette, G. G. (2006). *Nondestructive test methods for concrete: A state-of-the-art report* (ACI SP-120). American Concrete Institute.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

13. ACI Committee 201. (2008). *Guide for durable concrete* (ACI 201.2R-08). American Concrete Institute.
14. ACI Committee 347. (2014). *Guide for formwork for concrete* (ACI 347-04 / Reapproved 2014). American Concrete Institute.

Disclaimer/Publisher's Note:The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of LOUJASand/or the editor(s). LOUJASand/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.

(LOUJAS)**Copyright**: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions .of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)