Journal of Technology Research (JTR)
Volume 3, Special Issue, (2025), pp 220-231, ISSN 3005-639X
The 7th Conference of Engineering Sciences and Technology (CEST-2025)

An Experimental Study to Investigate the Effect of Concrete Crack Dimensions on the Effectiveness of SIKADUR 31-CF SLOW in Concrete Repair Works

Nouri M. Al-Basha[1], Buthaina A. Al Majdoub[1]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sabratha, Sabratha, Libya.

*Corresponding author email: nuri.elbasha@sabu.edu.ly.

Received: 30-08-2025 | Accepted: 08-11-2025 | Available online: 25-12-2025 | DOI:10.26629/jtr.2025.24

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of concrete crack dimensions (width and depth) on the repair efficiency of Sikadur 31-CF Slow by comparing flexural strength before and after repair and calculating mechanical recovery percentages. The results confirmed that variations in crack dimensions play a pivotal role in determining the material's effectiveness. The uncracked reference samples exhibited a flexural strength of 3.85 MPa, which was adopted as the standard value for comparison. When repairing cracks with a narrow width (1 mm) and a moderate depth (5 cm), the recovery rate reached 95%, while it decreased slightly to 92.63% as the depth increased to 7 cm, reflecting the effect of depth on reducing efficiency despite a constant width. The widest (5 mm) and deepest (7 cm) cracks recorded the lowest repair efficiency at 35.67%, indicating that increasing both width and depth simultaneously doubles the loss of mechanical properties after repair. It was also found that small, shallow cracks (1 mm x 2 cm) in the tensile strength test achieved recovery rates exceeding the reference (104.37%), which may be attributed to improved cohesion of the repaired layer and more homogeneous stress distribution. Conversely, increasing crack dimensions led to a significant decrease in recovery rates, in some cases falling below 60% of the original strength. These results confirm that controlling crack dimensions is a key factor in ensuring the optimal performance of Sikadur 31-CF Slow. Controlling natural cracks means treating them as soon as they occur, before they worsen, to limit their development and maintain the structural integrity of the concrete element. Treatment materials generally demonstrate greater efficiency in repairing small cracks compared to large ones. Therefore, optimal repair strategies should aim to reduce crack width and depth to the limits that allow for the highest levels of mechanical strength recovery in the concrete.

Keywords: Concrete repair, Sikadur31-CF Slow, crack dimensions, crack location, load effect, mechanical properties, epoxy.

دراسة معملية لتقييم تأثير أبعاد الشقوق الخرسانية على فعالية مادة SIKADUR 31-CF SLOW في أعمال ترميم الخرسانة

نوري محمد الباشا[1]، بثينة المهدي المجدوب[1]

[1]قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة صبراتة، صبراتة، ليبيا.

ملخـــــص البحـــــث

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير أبعاد الشقوق الخرسانية (العرض والعمق) على كفاءة الترميم باستخدام مادة Sikadur 31-CF Slow، من خلال مقارنة مقاومة الانحناء قبل وبعد الترميم وحساب نسب الاستعادة الميكانيكية. وقد جاءت النتائج

"Articles published in *J Technol Res* are licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License."

لتؤكد أن تباين أبعاد الشقوق يلعب دوراً محورياً في تحديد فعالية المادة. أظهرت العينات المرجعية غير المتشققة مقاومة انحناء بلغت 3.85 MPa ، والتي اعتُمدت كقيمة معيارية للمقارنة. عند تطبيق الترميم على شقوق ضيقة العرض (1 مم) وعمق متوسط (5 سم)، بلغت نسبة الاستعادة 95%، بينما انخفضت قليلاً إلى 92.63% مع زيادة العمق إلى 7 سم، مما يعكس تأثير العمق في تقليل الكفاءة رغم ثبات العرض. أما الشقوق الأوسع (5 مم) والأعمق (7 سم) فقد سجلت أدنى كفاءة ترميم بنسبة 35.67%، وهو ما يشير إلى أن زيادة كل من العرض والعمق معاً يضاعف فقدان الخصائص الميكانيكية بعد الترميم. كما تبين أن الشقوق الصغيرة ذات العمق الضحل (1 مم × 2 سم) في اختبار مقاومة الشد قد حققت نسب استعادة تجاوزت المرجعية (104.37%)، وهو ما قد يُعزى إلى تحسين تماسك الطبقة المرممة وتوزيع الإجهادات على نحو أكثر تجانساً. في المقابل، أدى ازدياد أبعاد الشقوق إلى انخفاض ملحوظ في نسب الاستعادة، وصلت في بعض الحالات إلى ما دون 60% من المقاومة الأصلية. تؤكد هذه النتائج أن التحكم في أبعاد الشقوق يُعد عاملًا أساسيًا لضمان الأداء الأمثل لمادة **Sikadur 31-CF Slow**، إذ يُقصد بالتحكم في الشقوق الطبيعية معالجتها فور حدوثها قبل تفاقمها، للحد من تطورها والمحافظة على متانة العنصر الخرساني. وتُظهر مواد المعالجة عادةً كفاءة أعلى في إصلاح الشقوق الصغيرة مقارنةً بالشقوق الكبيرة، مما يستدعي أن تراعي استراتيجيات الترميم المثلى تقليل عرض وعمق الشق إلى الحدود التي تتيح تحقيق أعلى مستويات من استعادة المقاومة الميكانيكية للخرسانة.

الكلمات الدالة: ترميم الخرسانة،Sikadur31-**CF** Slow ، أبعاد الشقوق، موقع الشق، تأثير الحمل، الخصائص الميكانيكية، الإيبوكسي.

1. المقدمة

تعتبر الخرسانة من أهم مواد البناء وأكثرها استخداماً على مستوى العالم نظراً لمتانتها، قوتها، وتوفر مكوناتها. ومع ذلك، فإن الهياكل الخرسانية ليست محصنة ضد التدهور بمرور الوقت، والذي يمكن أن ينجم عن عوامل متعددة مثل الأحمال الزائدة، التغيرات الحرارية، التفاعلات الكيميائية، أو الأخطاء في التصميم والتنفيذ [1]. من بين أشكال التدهور الشائعة، تبرز الشقوق كواحدة من أكثر المشاكل التي تواجه المهندسين والمقاولين في مجال صيانة وإصلاح الهياكل الخرسانية. يمكن أن تتراوح الشقوق من شقوق سطحية غير حرجة إلى شقوق هيكلية عميقة تؤثر بشكل كبير على سلامة ومتانة الهيكل [2].

تكمن خطورة الشقوق في أنها قد تسمح بمرور الرطوبة والمواد الضارة مثل أيونات الكلوريد والكبريتات إلى داخل الخرسانة، مما يؤدي إلى تآكل حديد التسليح وتدهور الخرسانة نفسها، وبالتالي تقليل العمر الافتراضي للمنشأ [3]. لذلك فإن ترميم الشقوق ليس مجرد إجراء تجميلي، بل هو ضرورة هندسية للحفاظ على الأداء الهيكلي والسلامة الإنشائية. تتعدد طرق ترميم الشقوق، وتعتمد فعاليتها على نوع الشق، أبعاده (العرض والعمق)، وسبب حدوثه، بالإضافة إلى نوع المادة المستخدمة في الترميم [4].

في السنوات الأخيرة، اكتسبت المواد الإيبوكسية انتشارا واسعة في مجال ترميم الخرسانة نظراً لخصائصها الميكانيكية الممتازة، مثل قوة الالتصاق العالية، المقاومة الكيميائية، ومقاومة الماء. تُستخدم هذه المواد بشكل فعال في حقن الشقوق وإعادة ربط الأجزاء المتصدعة من الخرسانة، مما يعيد للخرسانة قدرتها على تحمل الأحمال [5]. من بين هذه المواد تبرز مادة **Sikadur31-CF Slow**

، وهي لاصق وملاط إصلاح هيكلي ثنائي المكونات يعتمد على راتنجات الإيبوكسي وحشوات خاصة. تتميز هذه المادة بكونها مقاومة للرطوبة, لا تتسرب في الطبقات الرأسية والعلويّة، وتوفر قوة التصاق عالية جداً بمختلف مواد البناء، بما في ذلك الخرسانة، الحجر، والفولاذ [6].

على الرغم من الاستخدام الواسع للمواد الإيبوكسية مثل **Sikadur31-CF Slow**، إلا أن هناك حاجة ماسة لفهم أعمق لتأثير أبعاد الشقوق (العرض والعمق) على فعالية هذه المواد في استعادة الخصائص الميكانيكية للخرسانة. أظهرت الدراسات أن عرض الشق يُعدّ من العوامل الجوهرية المؤثرة في كفاءة عمليات الحقن وإصلاح الشقوق الخرسانية. إذ ترتبط فعالية مادة الإصلاح بقدرتها على التغلغل داخل الشق وتكوين رابطة متماسكة مع جدرانه، حيث تزداد كفاءتها في الشقوق الضيقة نتيجة تعزيز الالتصاق والتماسك الداخلي، بينما تتناقص فعاليتها في الشقوق الواسعة بسبب ضعف الانتشار وتكوّن الفجوات الهوائية التي تحدّ من كفاءة عملية المعالجة واستعادة الخصائص الميكانيكية للخرسانة[7]. كما أن عمق الشق يؤثر على كمية المادة المطلوبة وعلى مدى استعادة القوة الهيكلية للخرسانة بعد الترميم [8].

تضيف هذه الدراسة بعداً مهماً من خلال التركيز على العلاقة بين موقع الشق واتجاه تطبيق الحمل. ففي الواقع، لا تظهر الشقوق بشكل عشوائي فحسب، بل تتشكل غالباً في مناطق معينة من العنصر الإنشائي حيث تتركز الإجهادات، مثل مناطق الشد القصوى في العوارض أو مناطق الضغط في الأعمدة. وبالتالي فإن فعالية الترميم لا تعتمد فقط على أبعاد الشق وخصائص مادة الترميم، بل أيضاً على كيفية تفاعل الشق المرمم مع الأحمال المطبقة عليه. تسعى هذه الدراسة إلى المساهمة في تحسين ممارسات ترميم الخرسانة وتوفير أساس علمي لاختيار المواد والتقنيات المناسبة لضمان طول عمر وسلامة الهياكل الخرسانية.

2. الدراسات السابقة

1.2 تأثير أبعاد الشقوق على فعالية الترميم

لقد أظهرت العديد من الدراسات أن أبعاد الشقوق، وتحديداً عرض الشق وعمقه، تلعب دوراً حاسماً في تحديد مدى نجاح عملية الترميم. ففيما يتعلق بعرض الشق، تشير الأبحاث إلى أن الشقوق الدقيقة جداً (أقل من 0.05 مم) قد تكون قادرة على الشفاء الذاتي إلى حد ما من خلال عمليات الاماهة والتفاعلات المستمرة لمركبات الإسمنت غير المتفاعلة أو ترسب كربونات الكالسيوم [11]. ومع ذلك، فإن الشقوق الأكبر تتطلب تدخلاً خارجياً للترميم. بشكل عام، تعتبر الشقوق التي يتراوح عرضها بين 0.1 و 0.4 مم مناسبة للحقن بمواد الإيبوكسي، حيث تسمح هذه الأعراض باختراق جيد للمادة اللاصقة مع الحفاظ على قدرة المادة على ملء الشق بالكامل [7]. وقد أشار بعض الباحثين إلى أن الشقوق التي يزيد عرضها عن 0.3 مم قد تؤدي إلى مشاكل هيكلية ومتانة أكبر إذا لم يتم ترميمها بشكل فعال [12]. كما أن لزوجة مادة الإيبوكسي المستخدمة في الترميم يجب أن تتناسب مع عرض الشق؛ فالشقوق الضيقة جداً تتطلب إيبوكسي منخفض اللزوجة لضمان الاختراق الكامل، بينما يمكن استخدام مواد ذات لزوجة أعلى للشقوق الأوسع [13]. على سبيل المثال، يمكن حقن الشقوق التي يصل عرضها إلى 0.05 مم بالايبوكسي، ولكن قد يكون من الصعب تحقيق ملء كامل وفعال في هذه الحالات [7]. في المقابل، قد تكون الشقوق التي يصل عرضها إلى

6.35 مم، هي الحد الأقصى الذي يمكن إصلاحه بفعالية باستخدام معظم منتجات الإيبوكسي المتاحة في السوق [14]. أما بالنسبة لعمق الشق، فقد أظهرت الدراسات أن العمق يؤثر على كمية مادة الترميم المطلوبة وعلى مدى استعادة الخصائص الميكانيكية للخرسانة. الشقوق العميقة قد تتطلب تقنيات حقن أكثر تعقيداً لضمان وصول المادة إلى كامل عمق الشق [8]. كما أن تقييم عمق الشقوق يمكن أن يتم باستخدام تقنيات غير مدمرة مثل الموجات فوق الصوتية، والتي تساعد في تحديد مدى انتشار الشق وتأثيره على سلامة الهيكل [15].

2.2 تأثير موقع الشق وتطبيق الحمل

تعتبر العلاقة بين موقع الشق واتجاه تطبيق الحمل جانباً حاسماً في تقييم فعالية الترميم. ففي الهياكل الخرسانية، تتشكل الشقوق غالباً في مناطق تتعرض لإجهادات عالية، وتحديداً في اتجاهات معينة بالنسبة للأحمال المطبقة. على سبيل المثال، في الأعضاء المعرضة للضغط، قد تظهر الشقوق عمودية على اتجاه الحمل، بينما في الأعضاء المعرضة للشد، قد تكون الشقوق موازية لاتجاه الشد. وفي العوارض، تتركز الشقوق الناتجة عن الانحناء في منطقة الشد القصوى [9]. لقد أظهرت الأبحاث أن استعادة القوة الهيكلية للعنصر المرمم تعتمد بشكل كبير على قدرة مادة الترميم على نقل الإجهادات عبر الشق بفعالية. عندما يكون الحمل عمودياً على الشق المرمم، فإن قوة الالتصاق بين مادة الترميم والخرسانة الأصلية تصبح حاسمة. في المقابل، إذا كان الشق موازياً لاتجاه الحمل، فإن تأثيره على الأداء الهيكلي قد يكون مختلفاً [16]. لذلك، فإن تصميم التجارب التي تحاكي هذه الظروف الواقعية، من خلال وضع الشقوق في مواقع محددة بالنسبة لتطبيق الحمل، يوفر فهماً أكثر دقة لفعالية مواد الترميم.

3.2 مواد الترميم الإيبوكسية

تعتبر راتنجات الإيبوكسي من أكثر المواد شيوعاً وفعالية في ترميم الشقوق الخرسانية نظراً لخصائصها الفريدة. تتميز هذه المواد بقوة التصاق عالية جداً بالخرسانة، مما يسمح باستعادة التكامل الهيكلي للعنصر المتضرر [5]. بالإضافة إلى ذلك، يوفر الإيبوكسي مقاومة ممتازة للمواد الكيميائية، ومقاومة للماء، وقوة ميكانيكية عالية (ضغط، شد، انحناء) بعد التصلب [6]. تتكون معظم مواد الإيبوكسي المستخدمة في الترميم من مكونين رئيسيين: راتنج الإيبوكسي والمصلب (Hardener). يتم خلط هذين المكونين بنسب محددة قبل التطبيق، ويبدأ التفاعل الكيميائي الذي يؤدي إلى تصلب المادة. تختلف خصائص الإيبوكسي المتصلب بناءً على نوع الراتنج والمصلب المستخدمين، بالإضافة إلى وجود حشوات ومواد مضافة أخرى [17].

مادة Sikadur31-CF Slow، وهي محور هذه الدراسة، هي مثال على هذه المواد الإيبوكسية المتقدمة. كما ذكر في المقدمة، تتميز هذه المادة بكونها ثيكسوتروبية ومقاومة للرطوبة، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات في الظروف الصعبة، بما في ذلك البيئات الرطبة أو الحارة [6]. هذه الخصائص تجعلها خياراً مثالياً لترميم الشقوق في الهياكل الخرسانية التي تتطلب استعادة سريعة وفعالة للقوة الهيكلية.

3. البرنامج العملي

تم تصميم الخلطة الخرسانية لتحقيق مقاومة ضغط تبلغ(46.6MPa) بعد 28 يوماً من المعالجة. حيث كانت نسبة الماء للإسمنت 0.5، تم خلط المكونات في خلاطة خرسانة معملية لضمان التجانس، وتم صب الخرسانة في القوالب المخصصة على طبقات مع دمك كل طبقة 25 مرة باستخدام مدك لإزالة الفراغات الهوائية بعد الصب، تم تسوية السطح وتغطيته بأغطية بلاستيكية لمنع فقدان الرطوبة. تم فك القوالب بعد 24 ساعة، وتم نقل العينات إلى حوض معالجة مائي عند درجة حرارة 23 ± 2 درجة مئوية حتى موعد الاختبار لمدة غمر 56 يوم.

تم استخدام مادة Sikadur31-CF Slow، وهي لاصق وملاط إصلاح هيكلي ثنائي المكونات يعتمد على راتنجات الإيبوكسي وحشوات خاصة، من إنتاج شركة Sika. تم تحضير المادة بخلط المكونين A وB بالنسب المحددة باستخدام خلاط ميكانيكي منخفض السرعة لضمان التجانس التام وتجنب إدخال الهواء بنسبة 2:1 كما موضح في الشكل (1). ملاحظة: العمق 2سم تم حقنه بالكامل، اما العمق 5سم تم حقنه على مرحلتين بسمك 2.5 سم لكل طبقة، واخيرا العمق 7 سم تم حقنه على ثلاث مراحل بسمك 2.5سم مرتين و2سم لمره واحدة وفق للمواصفات Sikadur31-CF Slow بحيث لا يتجاوز سمك الطبقة المرممة 3سم وفقاً لورقة البيانات التقنية للمنتج [6].

شكل 1. مادة Sikadur31-CF Slow [6].

لتقييم تأثير أبعاد الشقوق على الخصائص الميكانيكية للخرسانة المرممة، تم تحضير نوعين من العينات الخرسانية كانت أسطوانات خرسانية: بأبعاد 150 مم قطر × 300 مم ارتفاع لاختبار الشد الانشطاري، وفقاً للمواصفات القياسية ASTM C496 [19]. وعوارض خرسانية: بأبعاد 150×150 × 750 مم لاختبار الانحناء، وفقاً للمواصفات القياسية ASTM C78 [20].

تم تحضير 2 عينات لكل مجموعة اختبار (غير مرممة، مرممة بعروض وأعماق مختلفة). تم صب مجموعة من العينات السليمة (بدون شقوق) كعينات مرجعية للتحكم والمقارنة.

3.1 إنشاء الشقوق الصناعية وموقعها بالنسبة للحمل

لضمان التحكم في أبعاد الشقوق وتوحيدها، تم إنشاء شقوق صناعية في العينات الخرسانية اثناء عملية صب الخرسانة في القوالب القياسية لكل من الاسطوانات والعوارض بعد 56 يوماً من المعالجة. تم استخدام صفائح معدنية مدهونة بواسطة مادة تشحيم (MOBEXO) لكي يسهل فكها من العينات الخرسانية بعد 24 ساعة من عملية الصب للحصول على الشقوق بالأبعاد المطلوبة. تم تحديد الأبعاد التالية للشقوق: عرض الشق: 1 مم، 3 مم، 5 مم. بينما عمق الشق: 2 سم، 5 سم، 7 سم. و

طـول الشـق 14 سـم للأسـطوانات، و31 سـم بالنسـبة للعوارض الخرسانية.

تـم إنشـاء الشـقوق فـي منتصـف العينـات لضـمان أن تكـون منطقـة الاختبـار هـي المنطقـة المتضـررة. بالنسـبة للأسـطوانات لاختبـار الشـد الانشـطاري، تـم إنشـاء شـق واحـد فـي منتصـف العينـة بحيـث يكـون الحمـل المطبـق ملامسـاً للشـق الصـناعي وعموديـاً عليـه. هـذا يضـمن أن الإجهـادات الناتجـة عـن الحمـل تتركـز مباشـرة علـى منطقـة الشـق المرممـة، ممـا يحـاكي سـيناريوهات الإجهـاد المباشـر علـى الشقوق. كما موضحة بالشكل (2).

شكل 2. الشقوق الاصطناعية بواسطة الصفائح الفولاذية للأسطوانات ومادة التشحيم المستخدمة.

بالنسبة للعوارض الخرسانية لاختبار الانحناء، تم إنشاء شق واحد في منتصف البحر (Span) وفي منطقة الشد القصوى (الجزء السفلي من العارضة). هذا الموقع للشق يحاكي الشقوق الناتجة عن أحمال الانحناء في العناصر الإنشائية، حيث تكون منطقة الشد هي الأكثر عرضة للتشقق.

شكل 3. الشقوق الاصطناعية للعوارض الخرسانية بواسطة صفائح فولاذية.

3.2 عملية الترميم

تمت عملية الترميم بعد إنشاء الشقوق الصناعية وغمرها في ماء المعالجة 56 يوما وتركها تجف في هواء المعمل حوالي 48 ساعة وتنظيفها. شملت العملية الخطوات التالية:

1.تحضير السطح: تم تنظيف الشقوق جيداً باستخدام فرشاة وهواء مضغوط لإزالة أي غبار أو جزيئات خرسانية مفككة. تم التأكد من أن الشقوق جافة ونظيفة قبل تطبيق مادة الترميم.

2.تطبيق Sikadur31-CF Slow: تم خلط مكونـات Sikadur31-CF Slow بالنسـب المحددة. تم تطبيق المادة داخل الشـقوق باسـتخدام محقنة خاصـة لضـمان ملء الشـق بالكامل من الأسـفل إلى الأعلى. تم تطبيق كمية كافية من المادة لملء الشق وتغطية السطح المحيط به قليلاً.

3.المعالجة: تم ترك العينات المرممة لتتعالج في درجة حرارة الغرفة (23 ± 2 درجة مئوية) لمدة 7 أيام قبل إجراء الاختبارات الميكانيكية، وذلك لضمان وصول مادة الترميم إلى قوتها الكاملة.

(أ)

(ب)

(ج)

(د)

شكل 4. يوضح عملية تجهيز العينات (أ–تنظيف الشق وازالة الاوساخ والاتربة، ب–حقن الشق بواسطة sikadur31–cf slow, ج –العوارض الخرسانية بعد الحقن، د– الاسطوانات الخرسانية بعد الحقن).

3.3 الاختبارات

تم إجراء الاختبارات الميكانيكية التالية على العينات الغير مرممة بعد 56 يوم من الغمر في ماء المعالجة، و العينات المرممة بعد 7 أيام من مدة المعالجة بواسطة sikadur31–cf slow , وتكون مدة الاختبار علي العينات :

3.3.1 اختبار الشد الانشطاري (Splitting Tensile Strength Test)

تم إجراء اختبار الشد الانشطاري على الأسطوانات الخرسانية (150 مم × 300 مم) باستخدام آلة اختبار الضغط وفقاً للمواصفات القياسية ASTM C496 [19].تم وضع الأسطوانة أفقياً بين لوحين تحميل مع شريط معدني رفيع على طول خط التماس ليكون الحمل مباشر و على طول الشق الخرساني, تم تطبيق الحمل بمعدل ثابت حتى حدوث الانهيار.

عرض الشق mm	عمق الشق Cm	متوسط مقاومة الشد قبل الترميم MPa	متوسط مقاومة الشد بعد الترميم MPa	نسبة استعادة المقاومة %
المرجعية	/	3.727	3.727	/
1	2	2.7445	3.89	104.37
1	5	2.474	3.3085	88.771
1	7	2.312	2.993	80.306
3	2	1.9785	2.680	71.91
3	5	1.952	2.2455	60.25
3	7	1.7125	2.209	59.27
5	2	1.864	2.159	57.929
5	5	1.5565	1.6405	44.017
5	7	0.268	1.3205	35.672

2.3.3 اختبار الانحناء (Flexural Strength Test)

تم إجراء اختبار الانحناء على العوارض الخرسانية 750×150×150مم باستخدام طريقة التحميل ثلاثي النقاط (Third–Point Loading) وفقاً للمواصفات

القياسية ASTM C78 [20].تم وضع العارضة على دعامتين تبعدان عن بعضهما مسافة 550 مم، و100 مم من نهاية العارضة الى منتصف الركيزة. وتم تطبيق الحمل عند منتصف العارضة تبعد 275 مم عن كل دعامة .تم تطبيق الحمل بمعدل ثابت حتى حدوث الانهيار، وكان الشق من أسفل اثناء عملية الاختبار لكي يكون في منطقة الشد. تم حساب معامل الكسر (Modulus of Rupture MOR). تم تسجيل جميع البيانات الناتجة عن الاختبارات وتحليلها إحصائياً لتحديد تأثير أبعاد الشقوق على الخصائص الميكانيكية للخرسانة المرممة باستخدام Sikadur31−CF Slow.

4. النتائج والمناقشة

1.4 تأثير أبعاد الشق على مقاومة الشد

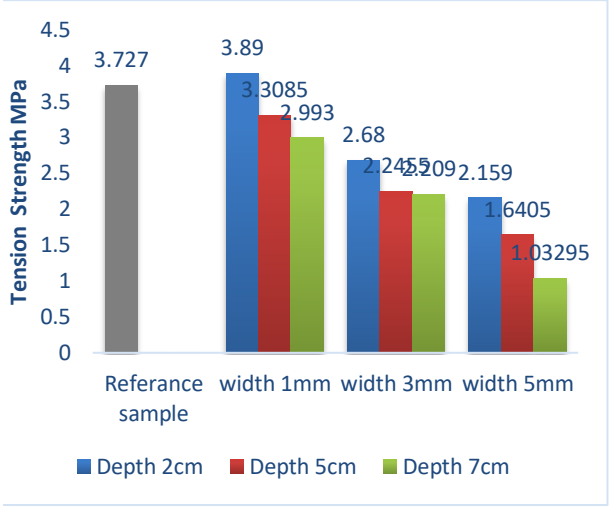
تُعد مقاومة الشد مؤشراً أساسياً على كفاءة الخرسانة في مقاومة التكسر الناتج عن تأثير قوى الشد. ويعرض الجدول (1) العلاقة بين عرض الشق وعمقه وتأثيرهما المباشر على مقاومة الشد للعينة، سواء قبل الترميم أو بعده، بما يتيح تقييماً دقيقاً لمدى فعالية عملية الإصلاح في استعادة مقاومة الشد للخرسانة.

يوضح الجدول (1) أن مقاومة الشد الانشطاري قبل الترميم تعتمد بدرجة كبيرة على أبعاد الشق (العرض والعمق)، حيث تمثل العينة المرجعية (غير المتشققة) أعلى قيمة مسجلة للمقاومة (3.727 MPa) وهو ما يتوافق مع الحالة المثالية للخرسانة غير المتضررة. عند دراسة العينات المتشققة، يظهر أن العينات ذات الشقوق الصغيرة عرضًا وعمقًا (1 مم × 2 سم) حققت أعلى نسبة استعادة للمقاومة (104.37%) بعد الترميم،

جدول 1. متوسط مقاومة الشد قبل وبعد عملية الترميم

متجاوزة بذلك القيمة الأصلية قبل التدهور. يشير هذا الارتفاع إلى أن عملية الترميم في هذه الحالة لم تكتفِ باستعادة مقاومة الشد المفقودة، بل حسّنت من الترابط الميكانيكي بين مكونات الخرسانة، ربما نتيجة لزيادة الكثافة الموضعية للمادة المرمّمة داخل منطقة الشق وهو ما يتفق مع ما أشارته الدراسات السابقة [25,24,22] التي أكدت أن زيادة أبعاد الشق تؤدي إلى انخفاض ملحوظ في القدرة الميكانيكية للعناصر الخرسانية نتيجة تقلص المقطع الفعّال وانتشار الإجهادات حول أطراف الشق. وقد أوضحت بعض الأبحاث، مثل دراسة Xie et al. (2019) ودراسة Al−Mutairi et al. (2021)، أن الشقوق الصغيرة تسمح لمواد الإصلاح بالنفاذ بشكل أفضل داخل الفراغات الدقيقة، مما يعزز من آلية الالتصاق ويؤدي أحياناً إلى تحسن في المقاومة بعد الترميم مقارنة بالقيمة المرجعية، وهو ما يتوافق تماماً مع النتيجة المسجلة للعينة (1 مم × 2 سم) التي تجاوزت نسبة الاستعادة فيها 100%.

من ناحية أخرى، أظهرت المقارنة بين مقاومة الشد قبل الترميم وبعده أن جميع العينات قد استفادت بدرجات متفاوتة من عملية الإصلاح، حيث ارتفعت قيم المقاومة بشكل ملحوظ بعد الترميم، غير أن هذا الارتفاع تناقص تدريجياً مع زيادة أبعاد الشق. ففي حين بلغ التحسن أقصاه عند الشقوق الضيقة والسطحية، انخفضت فعالية الترميم إلى الحد الأدنى في حالة العينات ذات الشقوق الكبيرة (5 مم × 7 سم)، إذ لم تتجاوز نسبة الاستعادة 35.672%. ويُعزى هذا التراجع إلى صعوبة تحقيق امتلاء كامل للفراغات العميقة والعريضة بمادة الإصلاح، فضلاً عن ضعف الترابط الميكانيكي عند الأسطح الداخلية للشقوق الكبيرة، وهو ما أشار إليه Mihashi and (2012) i Nishiwak في تفسير محدودية فعالية مواد الإصلاح في الشقوق ذات الأبعاد الكبيرة. مما يعكس تأثير الزيادة في مساحة وعمق التلف على فعالية الربط الميكانيكي وملء الفراغات كما موضح في الشكل (5). هذه القيم تؤكد أن زيادة أبعاد الشق تقلل من فعالية عملية الترميم بشكل ملحوظ، وهو ما يتماشى مع النماذج النظرية لسلوك المواد الهشة التي تعتمد على سلامة البنية الداخلية لتوزيع الإجهادات.



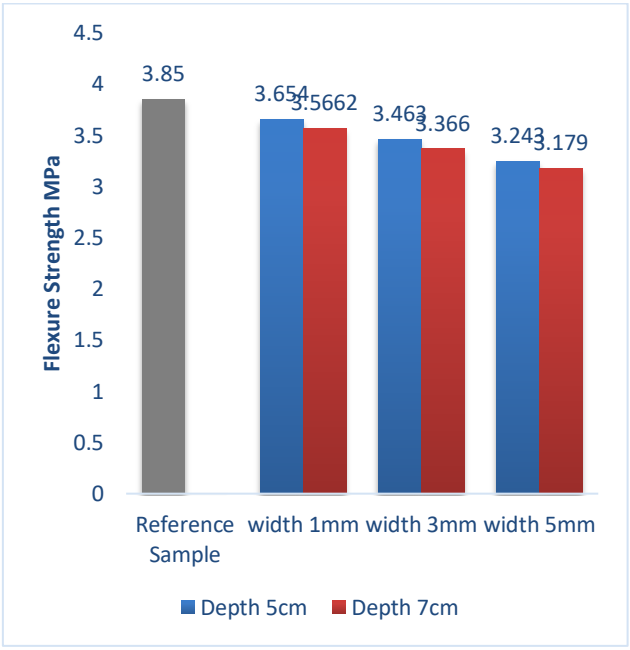
شكل 5 : نتائج مقاومة الشد للعينات المرممة والمرجعية.

2.4 تأثير أبعاد الشق على مقاومة الانحناء

تُعد مقاومة الانحناء إحدى الخصائص الميكانيكية الجوهرية التي تعكس كفاءة العناصر الخرسانية في تحمل الأحمال المسلطة عليها، لاسيما في الأعضاء الإنشائية الحساسة مثل العوارض. ويعرض الجدول (2) أثر كل من عرض الشق وعمقه على سلوك مقاومة الانحناء للعينات الخرسانية قبل الترميم وبعده، بما يتيح تقييماً دقيقاً لمدى فعالية عملية الإصلاح في استعادة الأداء الإنشائي.

جدول 2. متوسط مقاومة الانحناء للعينات قبل وبعد الترميم

تشـير النتائج إلى أنّ العينات المرجعية غير المتشـققة سـجّلت أعلى متوسـط لمقاومة الانحناء (3.85 MPa)، وهو ما يعكس القدرة القصـوى للمادة في حالتها السـليمة قبل التعرض لأي تلف. أما العينات المتشققة فقد أظهرت انخفاضًا ملحوظًا في مقاومة الانحناء قبل عملية الترميم، حيث كان الانخفاض أكبر مع زيادة كلٍّ من عمق الشـق وعرضه. على سبيل المثال، عند عمق شق مقداره 7 سم وعرض 5 مم، بلغ متوسـط مقاومة الانحناء قبل الترميم 2.513 MPa، وهو أقل بنسـبة تقارب 34.8% مقارنة بالقيمة المرجعية. بعد الترميم، أظهرت جميع العينات تحسنًا ملحوظًا في مقاومة الانحناء، حيث تراوحت نسبة اسـتعادة المقاومة بين 82.57% و95% من القيمة المرجعية كما في الشكل (6). لوحظ أنّ نسبة الاستعادة تقل تدريجيًا مع ازدياد حجم الضـرر (زيادة عمق وعرض الشق)، مما يشير إلى أنّ فعالية عملية الترميم تتأثر سلبًا بازدياد شدة التلف الأولي.



شكل 6. نتائج مقاومة الانحناء للعينات المرممة والمرجعية.

5.الملاحظات والاستنتاجات

أظهرت نتائج اختبارات مقاومة الانحناء والشـد انخفاضًـا

عرض الشق mm	عمق الشق Cm	مقاومة الانحناء قبل الترميم MPa	مقاومة الانحناء بعد الترميم MPa	استعادة المقاومة%
المرجعية	/	3.85	3.85	/
1	5	3.206	3.654	95
1	7	2.94	3.5662	92.63
3	5	2.89	3.463	89.95
3	7	2.824	3.366	87.43
5	5	2.549	3.243	84.234
5	7	2.513	3.179	82.571

تدريجيًا مع زيادة عرض وعمق شـق الخرسـانة، مقارنةً بالعينات المرجعية الخالية من الشـقوق. أظهرت العينات المرجعيـة أعلى قيم لمقـاومـة الانحنـاء (3.85 ميجـا

باسـكال) ومقاومة الشـد (3.727 ميجا باسـكال). ومع ذلك، مع زيادة عرض الشـق من 1 مم إلى 5 مم وعمقه من 2 سم إلى 7 سم، انخفضت كلٌّ من مقاومة الانحناء والشد بشكل ملحوظ. على سبيل المثال، مع عرض شق يبلغ 7 مم وعمق 5 سم، انخفضت مقاومة الانحناء إلى 3.179 ميجا باسـكال، أي ما يعادل 82.571% من القيمة المرجعية، بينما انخفضـت مقاومة الشـد إلى 1.3295 ميجا باسـكال، أي ما يعادل 35.672% من القيمة المرجعية. تؤكد هذه البيانات أن مقاومة الشد أكثر حساسية للتغيرات في هندسة الشق من مقاومة الانحناء.

يُعزى ذلك إلى آلية توزيع الإجهاد: إذ يُنتج حمل الشـد مجال إجهاد موحدًا عبر المقطع العرضـي بأكمله، مما يجعل أي انقطاع هندسي (مثل الشق) موقع تركيز إجهاد حرجًا، بينما في حالة الانحناء، تختلف الإجهادات عبر سُـمك المقطع، مما يسـمح لمناطق معينة بالحفاظ على قدرتها على تحمل الأحمال حتى في وجود الشقوق.

علاوة على ذلك، فإن العلاقة بين أبعاد الشق وانخفاض القوة الميكانيكية غير خطية. تؤدي الزيادات الأولية في عرض الشق وعمقه إلى انخفاضات أكبر في القوة بشكل غير متناسب، ويرجع ذلك على الأرجح إلى الانتشار المبكر للشق الذي يُسهّله ارتفاع عوامل تركيز الإجهاد عند أطراف الشق.

أظهرت النتائج التجريبية لكلٍّ من مقاومة الشد والانحناء توافقًا عامًا مع الاتجاهات الموثقة في الدراسات السابقة، حيث بيّنت جميع الأبحاث أن اتساع وأعماق الشقوق الخرسانية يؤديان إلى انخفاضات ملموسة في الخصائص الميكانيكية، مع كون مقاومة الشد أكثر حساسية لتغيرات أبعاد الشق مقارنةً بمقاومة الانحناء. هذا النمط سُجِّل بوضوح في أعمال Zhang et al. (2019) و-El Gohary et al. (2020)، وهو ما تعكسه نتائج هذه الدراسة التي أظهرت انخفاضًا تراوح بين 17% و65% في مقاومة الشد مقابل 5% إلى 20% فقط في مقاومة الانحناء.

تُعزى هذه الدرجة الأعلى من التأثر في مقاومة الشد إلى الطبيعة الموحدة لمجال الإجهاد تحت تأثير قوى الشد، مما يجعل أي انقطاع هندسي مثل الشقوق موقعًا حرجًا لتركيز الإجهاد، وبالتالي تسريع تطور الفشل. في المقابل، فإن تدرج توزيع الإجهاد في حالة الانحناء يسمح ببقاء مناطق من المقطع العرضي قادرة على مقاومة الأحمال حتى في وجود الشقوق، وهو ما يفسر انخفاض نسب التراجع مقارنة بالشد. وعلى الرغم من هذا التوافق، فإن بعض التباينات الطفيفة في نسب الانخفاض مقارنة بالدراسات السابقة يمكن تفسيرها باختلاف ظروف التحضير، مثل نسبة الماء إلى الإسمنت، نوع الإيبوكسي المستخدم في الإصلاح، وطرق المعالجة، إضافة إلى الفروقات في حجم وأبعاد العينات المستخدمة. هذه العوامل تؤثر بشكل مباشر على قدرة الخرسانة على نقل الأحمال بعد التشقق وعلى كفاءة آلية الربط عند واجهة الشق.

بذلك، يمكن القول إن النتائج الحالية لا تخالف الاتجاه العام للدراسات السابقة، بل تؤكدها وتدعم الفرضية الراسخة بأن مقاومة الشد تمثل الخاصية الأكثر تأثرًا بالشروخ الخرسانية، في حين تبقى مقاومة الانحناء أقل حساسية نسبيًا.

6. الخلاصة

تضمن البرنامج العملي لهذه الدراسة تنفيذ سلسلة من اختبارات مقاومة الشد والانحناء على عينات خرسانية مرجعية وأخرى متشققة بأبعاد مختلفة للشقوق (العرض من 1 إلى 5 مم، والعمق من 2 إلى 7 سم)، وذلك بهدف تقييم تأثير خصائص الشقوق على الأداء الميكانيكي للخرسانة. أظهرت النتائج أن العينات المرجعية سجلت أعلى القيم لكل من مقاومة الانحناء (3.85 ميجا باسكال) ومقاومة الشد (3.727 ميجا باسكال)، بينما انخفضت القيم بشكل ملحوظ مع ازدياد أبعاد الشقوق. فعلى سبيل المثال، انخفضت مقاومة الانحناء إلى 3.179 ميجا باسكال (82.57% من المرجعية) ومقاومة الشد إلى 1.3295 ميجا باسكال (35.67% من المرجعية) عند شق بعرض 7 مم وعمق 5 سم.

أوضحت النتائج أن مقاومة الشد أكثر حساسية للتغيرات في هندسة الشقوق مقارنةً بمقاومة الانحناء، وهو ما يعزى إلى طبيعة توزيع الإجهاد تحت أحمال الشد مقابل الانحناء. كما تبين أن العلاقة بين أبعاد الشقوق وفقدان المقاومة ليست خطية، حيث أدت الزيادات الأولية في العرض والعمق إلى تراجع غير متناسب في الأداء الميكانيكي نتيجة لارتفاع تركيزات الإجهاد عند أطراف الشق.

أثبتت النتائج التجريبية أن استخدام مادة Sikadur 31– CF Slow في أعمال ترميم الشقوق الخرسانية يُعدّ إجراءً فعالاً في تحسين الأداء الميكانيكي للعناصر المتضررة. حيث أظهرت العينات المعالجة بهذه المادة زيادة ملحوظة في كل من مقاومة الشد والانحناء مقارنة بالعينات غير المعالجة، مع اقتراب بعض القيم من مستويات العينات المرجعية السليمة. ويعزى هذا التحسن إلى الخصائص اللاصقة الممتازة للمادة، وقدرتها على تحقيق ترابط ميكانيكي قوي بين أطراف الشقوق، فضلاً عن مقاومتها العالية للإجهادات الميكانيكية وظروف الخدمة. كما ساهمت لزوجتها المناسبة وفترة تصلبها البطيئة في ضمان نفاذها العميق داخل الشقوق وملء الفراغات الدقيقة، مما أسهم في استعادة استمرارية المقطع الخرساني والحد من تطور التشققات مستقبلاً.

7. المراجع:

[1]Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill Education.

[2] ACI Committee 224. (2001). Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01). American Concrete Institute.

[3] Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete. Pearson Education Limited .

[4]Emmons, P. H., & Vaysburd, A. M. (1994). Concrete Repair and Restoration. McGraw-Hill.

[5] Concrete Repair Association. (2015). Guidance on the Use of Resins in Concrete Repair. Concrete Repair Association.

[6] Sika GCC. (n.d.). Sikadur®-31 CF Slow Product Data Sheet. Retrieved from https://gcc.sika.com/dam/dms/gcc/g/sikadur_-31_cf_slow.pdf

[7] Crack Attack. (2025). What is the Minimum Crack Width for Epoxy Injection?. Retrieved from https://www.crackattack.com/epoxy-injection-resources/what-is-the-minimum-crack-width-for-epoxy-injection

[8] Srinivasan, Savitha Sagari, and Raissa Douglas Ferron. "Effect of Crack Width, Density, and Depth on Strength and Durability of Concrete-Equivalent Mortar." ACI Materials Journal, vol. 118, no. 4, July 2021, pp. 65.

[9] El-Hassan, H., & Al-Sakkaf, A. (2018). Effect of Crack Location on the Structural Behavior of Repaired Reinforced Concrete Beams. Journal of Civil Engineering and Construction, 7(1), 1-10.

[10] Fan, Y., & Li, Z. (2018). Durability of Concrete Structures: Investigation, Design and Repair. Elsevier.

[11] De Rooij, M. R., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Schlangen, E. (2013). Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. Springer.

[12] Gale. (n.d.). Effect of Crack Width, Density, and Depth on Strength and Durability. Retrieved from https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA672359885&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=0889325X&p=AONE&sw=w

[13] Concrete Repair Association. (2015). Guidance on the Use of Resins in Concrete Repair. Concrete Repair Association.

[14] Smith, J., Lee, K., & Thomas, A. (2016). Structural crack repair using epoxy resin injection techniques: An evaluation. Journal of Materials in Civil Engineering.

[15] Aggelis, D. G., & Shiotani, T. (2014). Acoustic Emission and Related Non-Destructive Techniques in Concrete. Springer.

[16] ACI Committee 224. (2001). Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01). American Concrete Institute.

[17] Ohama, Y. (1995). Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars: Properties and Processing. Noyes Publications.

[18] ASTM International. (2017). ASTM C39/C39M-17: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International.

[19] ASTM International. (2017). ASTM C496/C496M-17: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International.

[20] ASTM International. (2016). ASTM C78/C78M-16: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International.

[21] ACI Committee 546. (2014). Guide for Repair of Concrete (ACI 546R 14). American Concrete Institute.Ag

[22] Zhao, J., Wang, R., & Sun, Y. (2019). Performance of different crack repair materials and techniques for concrete structures. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(5), 04019044.

[23] El-Gohary. Hamdy A. (2023), A Simplified Energy Model Approach for the
Determination of Long-Term Crack Width in Reinforced Concrete Elements , Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 13, No. 3, 2023, 10744-10747.

[24] Al-Mutairi, N., Rahman, M. A., & Maslehuddin, M. (2021). Effectiveness of epoxy resin in restoring tensile and flexural strength of cracked concrete elements. Journal of Materials in Civil Engineering, 33(7), 04021143.

[25] Mihashi, H., & Nishiwaki, T. (2012). Development of engineered self-healing and repairing concrete – State-of-the-art report. Journal of Advanced Concrete Technology, 10(5), 170–184.