دراسة تحليلية للسلوك الفتلي لجوائز البيتونية المسلحة المدعمة بالمونة الاسمنتية المقواة بالنسيج (TRM)

د. رلى زهير طه*
د. إحسان الطرشة**

□ ملخص □

يعد تدعيم العناصر البيتونية المسلحة أمراً ضرورياً للحفاظ على البنية التحتية المتقادمة وضمان توافقها مع المعايير الحديثة. وبينما يركز التصميم الإنشائي التقليدي على القوى المحورية وقوى القص وعزوم الانعطاف، يمكن أن تكون قوى الفتل عاملاً حرجاً في بعض أنواع الجوائز البيتونية المسلحة. تُستخدم تقنيات مثل البوليمرات المسلحة بالألياف (FRP) والمونة الاسمنتية المسلحة بالنسيج (TRM) لتحسين الأداء ضد الفتل، إلا أن الدراسات حول فعاليتها لا تزال محدودة. تبحث هذه الدراسة في تأثير تقنية (TRM) باستخدام الألياف البازلتية على مقاومة الفتل في الجوائز البيتونية المسلحة. تم إعداد نموذج تحليلي يقارن بين جائز غير مدعم وجائزين مدعمين باستخدام طبقة واحدة من ألياف البازلت (بقطر 0.064mm وبفتحات شبكية 25×25mm) مع تطويق من جانبين وثلاث جوانب. أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في الصلابة ومقاومة الفتل، حيث حقق التطويق من ثلاث جوانب زيادة في المقاومة بمقدار 65% وتأخر في بدء التشقق. أما التطويق من جهتين فحسن الأداء لكنه أظهرت انفصال في المنطقة الرابطة بين الجائز البيتوني وطبقة التدعيم.

الكلمات المفتاحية: المونة الاسمنتية المسلحة بالنسيج، الفتل، التدعيم، الألياف البازلتية.

*** مدرسة– قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية– جامعة الوادي الخاصة– سورية.**
**** أستاذ– قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية– الجامعة الوطنية الخاصة– سورية.**

Analytical Study of The Torsional performances of strengthened Reinforced concrete beams using Textile-Reinforced Mortar (TRM)

Dr. Roula Taha*
Dr. Ihssan Tarsha**

□ ABSTRACT □

Strengthening reinforced concrete (RC) elements is vital for maintaining aging infrastructure and meeting modern standards. While conventional design focuses on axial, shear, and bending actions, torsion can be critical in certain RC beam configurations. Techniques like Fiber-Reinforced Polymers (FRP) and Textile-Reinforced Mortar (TRM) are used to enhance torsional performance, though research on their effectiveness remains limited.

This study examines investigates the effect of (TRM) with basalt fiber textiles on RC beams' torsional resistance of selected RC beams. An analytical model compared one unstrengthened beam with two beams strengthened using a single basalt fiber layer (0.064 mm diameter, 25×25 mm mesh) in two- and three-sided wrapping. The results showed significant stiffness and torsional strength gains, with three-sided wrapping achieving a 65% strength increase and delayed cracking. Two-sided wrapping improved performance but suffered from debonding at the concrete–strengthening interface.

Key words: Textile-Reinforced Mortar, Torsion, Strengthen, Basalt - based textile, ABAQUS.

***Doctor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Al-Wadi International University, Syria.**
****Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Homs University, Syria.**

1-مقدمة:

أصبح ترميم (Repair) وإعادة تأهيل (Rehabilitation) المنشآت القائمة جزءاً أساسياً من أعمال البناء. إذ يتضرر البيتون المسلح في المنشآت الهندسية بسبب استمرار تعرضها لأحمال أكبر من الأحمال التصميمية، عدم توخي الدقة في التصميم، عدم السيطرة على جودة المواد المكونة للبيتون المسلح أثناء التنفيذ، هبوط بالأساسات وغيرها من الأسباب، الأمر الذي جعل الباحثون يفكرون في إيجاد وسائل كفيلة بترميم وإعادة تأهيل الهياكل البيتونية المسلحة لكي تؤدي وظيفتها بشكل فعال وآمن قبل أن يصبح الاستبدال أو الهدم ضرورة حتمية [2]. يوجد في مجال التدعيم (إعادة التأهيل) عدد كبير من الدراسات التي تناولت القص والانعطاف إلا أن تأثيرات الفتل غالباً ما كان يتم تجاهلها بسبب الطبيعة المعقدة للفتل بالإضافة لمرافقته لقوى أخرى. تسلك العناصر الإنشائية المدعمة سلوكاً أكثر تعقيداً مقارنةً بالعناصر من دون تدعيم، لذلك من الضروري فهم سلوك الجوائز البيتونية المسلحة تحت تأثير الفتل[8]. منذ ما يقرب من عقد من الزمن، تم تقديم مادة مركبة مبتكرة تعتمد على الاسمنت تعرف باسم المونة المسلحة بالنسيج (TRM) كبديل للعديد من تقنيات التدعيم ولاسيما البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)، وذلك بهدف معالجة مشاكل التكلفة والمتانة. ومنذ ظهورها لاقت TRM اهتماماً متزايداً [6]. تتكون المونة المسلحة بالنسيج (TRM) من ألياف عالية المقاومة مثل الكربون أو الزجاج أو البازلت، يتم تشكيلها على هيئة أنسجة ودمجها مع مواد رابطة غير عضوية مثل المونة الاسمنتية، مكونةً شبكة مفتوحة [5]. تعد(TRM) حلاً مناسباً لأعمال التدعيم لأنها تجمع بين الخصائص الممتازة للمواد المركبة (مثل المقاومة العالية، الوزن الخفيف ومقاومة التآكل) والخصائص الفريدة للمونة. كما أنها تدمج بفعالية بين مقاومة الشد العالية للأنسجة ومقاومة الضغط للمونة مما يؤدي إلى إنتاج مادة مركبة توفر مقاومة عالية على الفتل وصلابة محسنة [3]. يفضل العديد من الباحثين إجراء الدراسات التحليلية لتقييم السلوك الإنشائي للعناصر المدروسة نظراً لأن تحليل العناصر المنتهية (FE) يوفر وسيلة

فعالة من حيث التكلفة تتيح بناء نماذج محاكاة مثالية، مما يسهم في تقليل الحاجة إلى إجراء تجارب معملية مكلفة في المراحل الأولية من البحث [3].

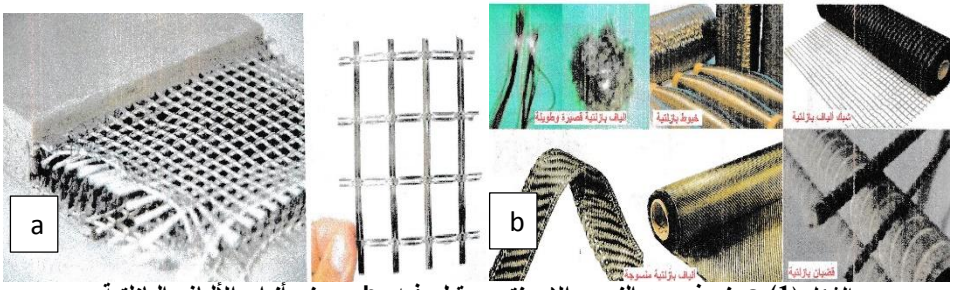
2-هدف البحث:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم السلوك الفتلي لجوائز بيتونية مسلحة مدعمة بمونة اسمنتية مسلحة بألياف بازلتية تحليلاً باستخدام برنامج ABAQUS عندما جهة تطويق المونة المسلحة بالنسيج من جهتين ومن ثلاث جهات، وذلك من خلال مقارنة قيم كل من عزم الفتل وزاوية الفتل وتطور التشققات مع الجائز المرجعي غير المدعم.

3-مواد وطرق البحث:

3-1 التعريف بالمونة الإسمنتية المسلحة بالنسيج (TRM):

المونة الاسمنتية المسلحة بالنسيج (Textile Reinforced Mortar-TRM) هي نظام تقوية غير تقليدي يعتمد على دمج نسيج من ألياف مقاومة للشد، الشكل(1-a)، مثل ألياف البازلت أو الألياف الزجاجية، مع مونة اسمنتية. يتميز هذا النظام بقدرته على تحسين مقاومة الشد للبيتون، مما يجعله مناسباً لتطبيقات التدعيم والتقوية الهيكلية. تعتبر ألياف البازلت خياراً مناسباً في (TRM) نظراً لخصائصها الفريدة، الشكل(2-b): إذ تتميز ألياف البازلت بأنها مقاومة للتآكل مما يساهم في زيادة عمر المنشآت كما أنها مقاومة للحرارة، وهي مادة طبيعية مما يقلل من التأثير البيئي مقارنة بالمواد الأخرى[3-4] .



الشكل (1) a-نموذج من النسيج الإسمنتي ومقطع فيه b- بعض أنواع الألياف البازلتية

إن التفاعل في نظام التدعيم القائم على مركب من المونة الاسمنتية والألياف يمكن تحسينه عن طريق استبدال ألواح الألياف بشبكات ألياف ثنائية الاتجاه. يمكن تعديل الخصائص الميكانيكية للنسيج بسهولة من خلال تعديل المسافة بين الخيوط، التي يمكن ضبطها وفقًا لدرجة التغلغل المطلوبة للمونة عبر الفتحات[6]. يجب أن تتمتع المونة المستخدمة بخصائص ربط قوية، وانكماش قليل، وقابلية عمل عالية، وقوة شد وقوة قص كبيرة لتجنب فشل الارتباط بين الركيزة (المونة) والشبكات النسيجية [5].

3-2 دراسة مرجعية:

لقد تم تطبيق شبكات النسيج لتدعيم المواد المعتمدة على الاسمنت منذ الثمانينات، إذ بدأ التركيز مؤخراً يتحول وبشكل متزايد من الروابط المعتمدة على الإيبوكسي إلى الروابط المعتمدة على الأسمنت.

إن أنماط الانهيار التي قد تواجهها هذه الأنظمة من التدعيم هي سحب شبك الألياف من المونة عندما لا يكون التماسك بينهما كافياً، فقدان الترابط الميكانيكي والكيميائي بين الألياف والمونة في منطقة الالتقاء، وفصل طبقة (TRM) عن سطح الجائز البيتوني نتيجة فشل الالتصاق بسبب ضعف تحضير السطح البيتوني [5]. ورغم التحديات الناتجة عن تأمين التصاق موثوق بين طبقة التدعيم والعنصر الإنشائي المدعم فقد ظهرت نتائج مشجعة من استخدام (TRM) في تقوية الجوائز البيتونية المسلحة على عزوم الانعطاف وقوى القص [6,5] كما في الأبحاث التي أجراها MASSOD& LORETO وهناك حاجة للمزيد من الدراسات والاختبارات ولاسيما عند التعرض للفتل. قد تساعد المونة الاسمنتية المسلحة بالنسيج (TRM) في تقليل سمك الغطاء الخرساني المطلوب لحماية الحديد من الصدأ، كما أن وزنه الذاتي منخفض وفعّال في تحسين كل من أحمال الانهيار وسلوك التشوه للجوائز البيتونية المسلحة في كل من القص والانحناء [5].

قليل من الدراسات قد تناولت بشكل مباشر تأثير التدعيم بالمونة المسلحة بالنسيج (TRM) في تقوية الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل، حيث أكد HUDHAIFA (2025) أن(TRM) يمكن أن يعزز قدرة الجوائز البيتونية المسلحة على مقاومة االفتل بشكل كبير مع الحفاظ على نمط

انهيار مرغوب فيه، مما يتجنب الانهيار الهش الذي يُلاحظ عادة في أنظمة (FRP) عند التعرض للفتل. كما أكدت العديد من الدراسات التجريبية والتحليلية على تأثير التدعيم بالمونة المسلحة بالنسيج (TRM) على تحسين المطاوعة وتوزيع الشقوق. وقارن العديد من الباحثين بين (TRM) و(FRP) [5]، ووجدوا أداءاً جيداً لـ (TRM) في مقاومة الأحمال الفتلية، مع توزيع أفضل للإجهاد وأداء محسن على المدى الطويل تحت ظروف التحميل الدوري.

على الرغم من أن (TRM) أظهر فعاليته في تعزيز المقاومة الفتلية في الجوائز البيتونية المسلحة، فإن مميزاته ونقاط ضعفه في التطبيقات المحددة بحاجة إلى مزيد من الاستكشاف. يمكن أن تقدم الدراسات المقارنة باستخدام الأساليب التجريبية، جنبًا إلى جنب مع المحاكاة العددية المتقدمة مثل (FEA)، رؤى قيمة حول أدائهما تحت تأثير قوى الفتل. سيساعد هذا البحث المهندسين في اختيار المادة الأنسب لاحتياجات التقوية المحددة، مع مراعاة عوامل مثل التكلفة، والتوافر، والظروف البيئية، والأداء الهيكلي المطلوب.

3-3 الدراسة التحليلية:

تتضمن هذه الدراسة وضع نماذج تحليلية لثلاث جوائز بيتونية مسلحة باستخدام برنامج ABAQUS أحدها (جائز مرجعي) (BC) بأبعاد (250x125x1700)mm وجائزين تم تدعيمهما بتقنية (TRM) باستخدام الالياف البازلتية عندما تنفذ طبقة التقوية من ثلاث جهات (BT-1) ومن جهتين (BT-2)، وتعريضها تحليلياً لقوى فتل ونستعرض في الجدول (1) الخصائص الميكانيكية للألياف البازلتية المستخدمة في طبقة (TRM) وفقاً للشركة المصنعة. تم تسليح الجوائز البيتونية بعد تصميمها على الفتل بالاعتماد على الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة بتسليح سفلي (2T12mm) من الأسفل وتسليح علوي 2T12 (mm) أما التسليح العرضي فقد استخدم أساور مغلقة بقطر (8mm) وتباعد (100mm)، اجهاد البيتون على الضغط للجائز البيتوني والمونة الاسمنتية المغلفة لها (25 MPa)، واجهاد الخضوع لفولاذ التسليح الطولي (450 MPa) وفولاذ التسليح العرضي (370 MPa) وذلك بالاعتماد على الدراسة التجريبية التي نفذت في مخبر البيتون لجوائز بيتونية مسلحة بنفس الأبعاد والتسليح والخاضعة للفتل [9-8]. تم تطبيق الفتل تحليلياً بشكل يحاكي آلية تطبيقه تجريبياً [4,8] وذلك

من خلال تطبيق قوة مركزة على جائز I فولاذي يستند الى ذراعين معدنيين يتوضعان بشكل متعاكس وملاصقين للمساند لضمان توليد قوى فتل صافية.

الجدول (1) الخصائص الميكانيكية للألياف البازلتية المستخدمة في طبقة TRM [3]

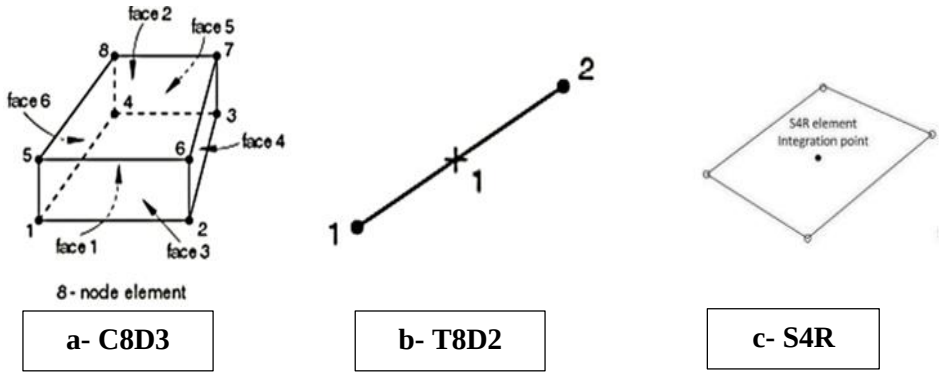
سماكة الألياف البازلتية mm	أبعاد فتحة الألياف mm	الكثافة Kg/m^3	إجهاد الشد MPa	معامل المرونة (E) MPa	معامل بواسون μ
0.064	25x25	1740	623	31940	0.22

3-3-1 النموذج التحليلي:

تعد المونة المسلحة بالألياف (TRM) من المواد المركبة التي تفرض تحديات كبيرة في التحليل العددي بسبب السلوكيات غير الخطية المعقدة المصاحبة لها، مثل خضوع الفولاذ، وتلدّن الخرسانة، وتكوّن الشقوق والانهيار على الضغط. وعلى الرغم من أن العديد من الدراسات باستخدام نمذجة العناصر المحدودة (FEM) قد تناولت الجوائز البيتونية المسلحة تحت تأثير القص وعزوم الانعطاف، إلا أن الدراسات التي تركز على السلوك الفتلي ما زالت محدودة [8]. في هذه الدراسة، تم تطوير نماذج ثلاثية الأبعاد غير خطية باستخدام برنامج ABAQUS بهدف التنبؤ بالأداء الفتلي للجوائز البيتونية المسلحة والمقواة بنظام (TRM) من جانبين وثلاثة جوانب.

من أجل تمثيل سلوك الجوائز الخرسانية المسلحة المختبرة بدقة، تم اعتماد نمذجة حجم الخرسانة باستخدام عناصر صلبة من نوع (C8D3)، وهي عناصر تتكوّن من ثماني عقد، كل منها تمتلك ثلاث درجات من الحرية تمثل الإزاحات في الاتجاهات الثلاثة (x, y, z) كما هو موضح في الشكل (2-a) وقد استُخدم هذا العنصر في تمثيل كل من الجائز الخرساني، وأذرع الفتل الفولاذية، وكذلك طبقة المونة. أما عناصر التسليح الطولي، وأساور التسليح العرضي، فقد تم تمثيلها باستخدام عناصر شعاعية من نوع(T8D2)، والتي تتكون من عقدتين، تمتلك كل منهما ثلاث درجات من الحرية، كما هو موضح في الشكل (2-b). في حين تم تمثيل النسيج البازلتي باستخدام عناصر قشرية رباعية العقد من نوع (S4R)، قادرة على محاكاة كل من الإجهادات

المستوية وتأثيرات الانحناء، كما هو موضح في الشكل (2–c)، وذلك وفقاً لما ورد في [3]. (Elsanadedy,2013) تمت نمذجة النسيج البازلتي المرتب في اتجاهين متعامدين كمادة متباينة الخواص بسمك مكافئ يبلغ (0.064 mm) لكل طبقة، وهي خاصية ضرورية لضمان دقة التنبؤ بسلوك الأنسجة ضمن الأنظمة المركبة مثل أنظمة (TRM).



الشكل (2) العناصر المحدودة المستخدمة في النموذج التحليلي

إن تحقيق تفاعل فعال بين الخرسانة والتسليح شرط رئيسي للوصول الى سلوك يحاكي السلوك الحقيقي للجوائز البيتونية ولتحقيق ذلك، تم نمذجة التسليح كمنطقة مدمجة (Embedded Region) لربط عناصر التسليح بالخرسانة بشكل مناسب. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام قيد الربط (Tie Constraint) لربط أذرع الفتل بالجائز البيتوني بهدف نقل الأحمال بشكل دقيق خلال التحليل العددي. كما تم تطوير نماذج العناصر المحدودة من خلال تضمين النسيج القاعدي المصنوع من البازلت ضمن طبقة المونة، وذلك لضمان التكامل البنيوي لمحاكاة الأداء المركب لنظام(TRM).

أما مقاربات النمذجة للمواد فتمت على الشكل التالي: اعتمد نموذج اللدونة المتضررة damaged plasticity model (CDP) لمحاكاة سلوك البيتون حيث يتيح هذا النموذج تمثيل السلوك غير الخطي للبيتون [1]، بما في ذلك التشوه اللدن وتكوّن الشقوق وفق القيم التي تم اعتمادها والواردة في الجدول (2).

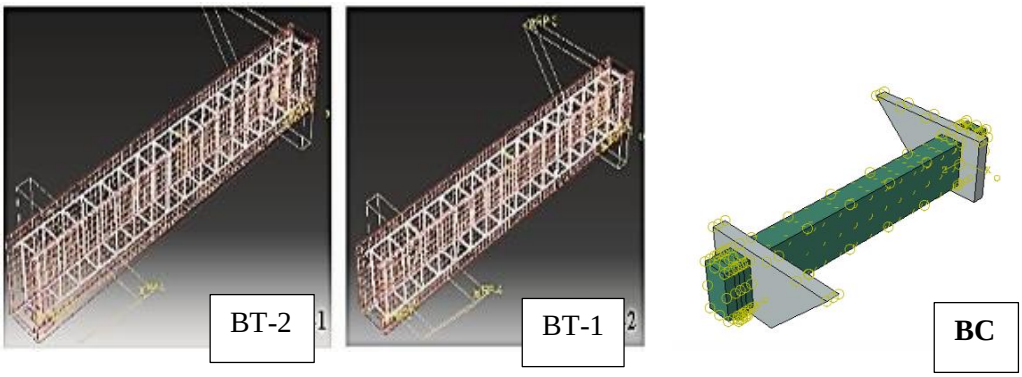
الجدول (2) البيانات والمعاملات المعتمدة في نموذج CDP

معامل بواسون (μ)	معامل المرونة للخرسانة (Ec)	معامل اللزوجة Viscosity) (parameter	سطح التلدن (k)	نسبة الضغط الثنائي إلى الأحادي (f_{bo}/f_{co})	كمون التدفق اللامركزي (Eccentricity Flow potential)	زاوية الاحتكاك الداخلية للخرسانة (Fraction angle) (Ø)
0.2	24263.11	0.0005	0.667	1.16	0.1	31

بينما تم تطبيق النموذج المرن–اللدن (Elastic-Plastic) على قضبان التسليح الفولاذية الموجودة داخل البيتون، وذلك بهدف تمثيل خصائص التلدن والتصلب للفولاذ تحت تأثير الأحمال بشكل دقيق. أما النسيج القاعدي المدمج بالمونة والمصنوع من البازلت فنمذج باستخدام (Elastic-Lamina)، حيث يُعد التمثيل الدقيق للخصائص الموحدة في ثلاث اتجاهات متعامدة (Orthotropic)أمراً ضرورياً لنمذجة المواد المركبة المدمجة داخل المونة، كما هو موضح في الجدول(3) . وقد ساهمت هذه النماذج المادية في تقديم تمثيل شامل وواقعي لمكونات نظام الجائز البيتوني المسلح. كما يظهر في الشكل (3).

الجدول (3) الخصائص المستخدمة في نموذج Elastic-Lamina [1,3]

الكثافة	معامل المرونة E1, E2, E3	معامل بواسون μ	معامل القص G1, G2, G3	اجهاد الشد	السماكة
Kg/m^3	MPa		MPa	MPa	mm
1740	31940	0.22	13090	623	0.064



الشكل(3) النموذج التحليلي للجائز المرجعي والجائزين المقويين بالـ (TRM)

في هذه الدراسة، تم اختيار مقاس شبكة Mesh بمقدار (25mm) لتحقيق توازن بين كفاءة الحسابات العددية ودقة تمثيل الاستجابات الإنشائية الهامة. وقد تم اعتماد التحليل الستاتيكي كخطوات (Static Step) باستخدام فترات زمنية مناسبة، مع أخذ اللاخطية الهندسية بعين الاعتبار، وذلك لمحاكاة سلوك الجوائز المختبرة بشكل واقعي. تم استخراج عزم التشقق وعزم الانهيار، وزاويتَي الفتل المقابلتين لهما من مخرجات برنامج ABAQUS باستخدام أدوات التحكم في النتائج (Output Control)، كما تم رسم العلاقة بين عزم الفتل (T) وزاوية الفتل النسبية الموافقة(θ) من أجل كل نموذج من النماذج المدروسة الممثلة للجوائز المختبرة. بالإضافة إلى ذلك، تمت مراقبة تطور وانتشار الشقوق منذ لحظة ظهورها الأولى وحتى انهيار الجائز.

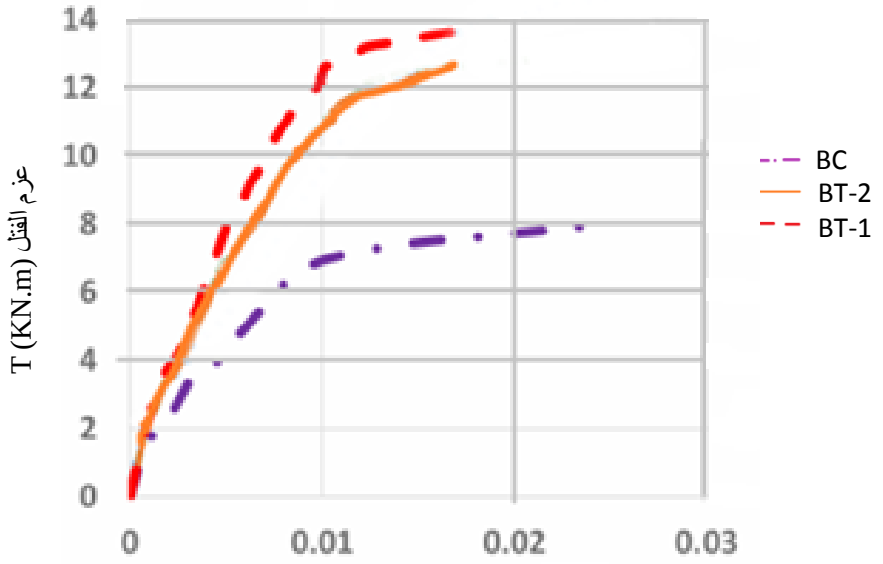
4-النتائج ومناقشتها:

تم عرض العلاقة بين عزم الفتل (T) وزاوية الفتل النسبية (θ) المستخرجة من نماذج العناصر المحدودة لجائزين مدعمين بالنسيج البازلتي وجائز مرجعي غير مقوى كما يظهر في الشكل (4)بهدف إجراء مقارنة شاملة. كما تم تلخيص القيم العددية المقابلة، والتي تشمل عزم التشقق، عزم الانهيار، زاوية الفتل عند ظهور الشق الاول وزاوية الفتل عند الانهيار، في الجدول(4) .

أظهرت استجابات جميع النماذج سلوكاً مشابهاً يمكن تقسيمه إلى ثلاث مراحل رئيسية: تمثّل المرحلة الأولى السلوك المرن قبل التشقق، والذي تميّز بعلاقة خطية بين عزم الفتل وزاوية

الفتل، أما المرحلة الثانية فقد شهدت بدء التشققات وتطورها إلى أن حدث خضوع لتسليح الفولاذ الداخلي. بينما عبّرت المرحلة الثالثة عن السلوك بعد الخضوع، حيث بدأ العزم بالتناقص تدريجياً حتى الوصول إلى الانهيار النهائي للجائز.

في بداية التحميل، أظهرت منحنيات العزم مقابل زاوية الفتل سلوكاً شبه خطي مع صلابة ابتدائية عالية، حتى ظهور أول شق، وهو ما يمثل المرحلة الأولى غير المتشققة. بعد حدوث التشقق، استمر السلوك بشكل شبه خطي، ولكن مع انخفاض ملحوظ في الصلابة.



الشكل (4) يظهر المنحني البياني لزاوية الفتل النسبية الناتجة عن تأثير عزم الفتل للجوائز المدروسة

في المرحلة الثانية من السلوك(**المرحلة المرنة–اللدنة**) تراوحت قيم العزم في الجائز المرجعي (BC) بين (4.468KN.m −7.341KN.m)، في حين أظهرت الجوائز المقواة بـ(TRM) (BT-1) و(BT-2) نطاقات عزم أعلى تراوحت بين (7KN.m−11KN.m)، مما يشير إلى تفعيل مساهمة مواد التقوية في تعزيز المقاومة الفتلية مع اقتراب النماذج من القدرة النهائية، بدأ السلوك في إظهار لاخطية واضحة وانخفاض إضافي في الصلابة. حيث سجلت الجوائز-BT)

اسم الجائز	عزم الفتل عند الشق الأول (عزم التشقق) T_{cr} (KN.m)	زاوية الدوران النسبية عند الشق الأول (rad/m)	عزم الفتل عند الانهيار T_{ult} (KN.m)	زاوية الدوران النسبية عند الانهيار (rad/m)	نسبة تحسن عزم الانهيار بالنسبة للجوائز المرجعية
BC	4.468	0.00523	8.046	0.025	
BT-1 من ثلاث جهات	8.068	0.00524	13.649	0.0169	65%
BT-2 من جهتين	6.765	0.00483	12.556	0.01662	56%

الجدول(4) مقارنة عزوم الفتل وزوايا الدوران النسبية للجائز المرجعي والجوائز المدعمة

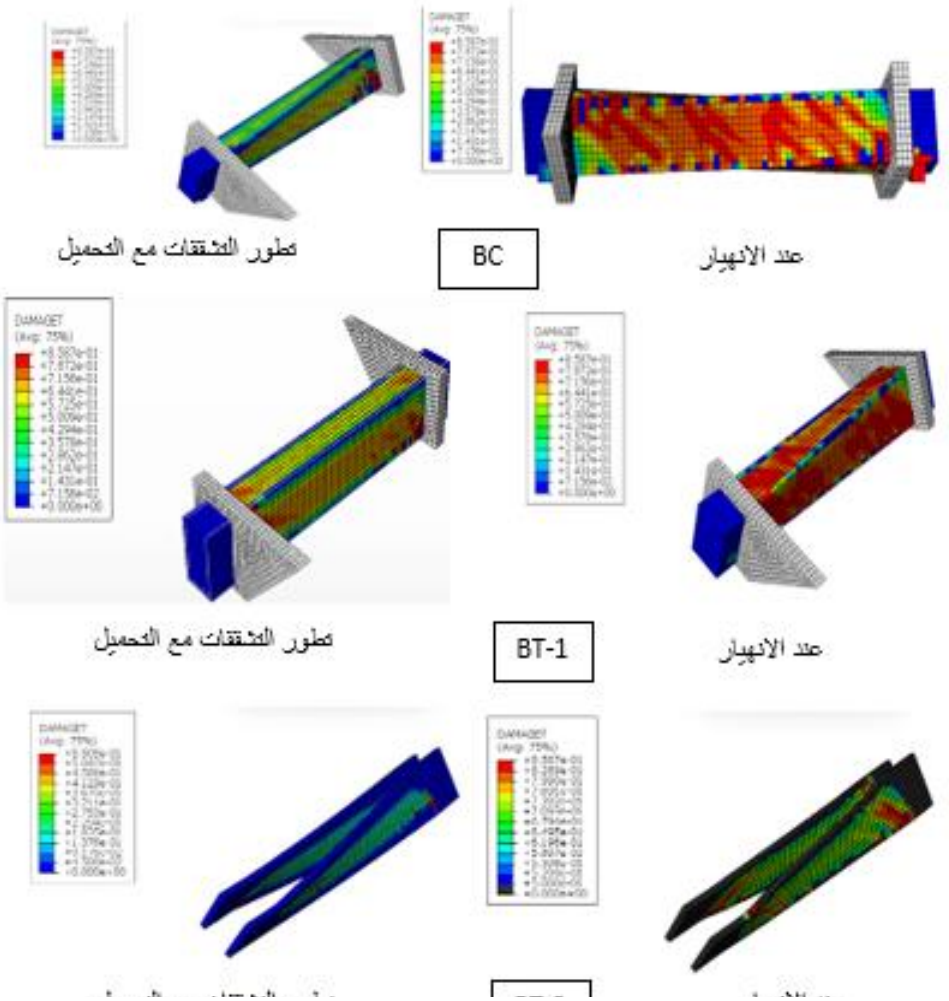
(1 و (BT-2) انخفاضاً حاداً في الأداء بعد مرحلة الخضوع، مع زيادة محدودة جداً في زاوية الفتل أو عزم الانهيار.

أظهرت النماذج المقواة سواء من جهتين أو من ثلاث جهات قدرة جيدة على التحكم في التشقق. وقد ساهم التقوية من ثلاث جهات في تأخير ظهور الشقوق الأولى، حيث بلغ عزم الفتل الموافق لظهور الشق الاول (8.068 KN.m) في(BT-1)، بزيادة قدرها حوالي **44 %** مقارنة بالجائز المرجعي(BC). بصورة عامة، أظهرت الجوائز المقواة من ثلاث جهات أداءً فتلياً أفضل من تلك المقواة من جانبين فقط، كما هو موضح في الشكل(9)، ويُعزى ذلك إلى تحسين آلية الربط وتقليل فرص الانفصال أو الانزلاق تحت الأحمال المرتفعة.

وقد أثبت (TRM) فعاليته كنظام تقوية حسّن من قدرة التحمل. بينما بلغ الجائز المرجعي (BC) أقصى عزم بلغ (8.046 KN.m) عند زاوية فتل نسبية بلغت (0.0249 rad/m) حققت الجوائز المقواة زوايا مشابهة ولكن عند مستويات عزم أعلى بكثير. يظهر الشكل (10) تطور الشقوق في الجائز المرجعي (BC) خلال مرحلة التحميل الأولية وبعد الوصول إلى الانهيار وفق آلية أساسية كانت ناتجة عن الفتل، حيث ظهرت الشقوق بزاوية ميل تقارب 45 درجة بالنسبة للمحور الطولي للجائز. وقد تطورت هذه الشقوق المائلة لتُشكّل نمطاً حلزونياً مستمراً حول السطح الخارجي للجائز

كما يظهر الشكل (10) أن الجائز(BT-1) أبدى قدرة أفضل على التحكم في انتشار الشقوق مقارنة مع الجائز المرجعي ومع الجائز(BT-2)، حيث كانت الشقوق أقل عدداً وأكثر انتظاماً. أما في مرحلة الانهيار، أظهرت الجوائز (BT-1) مقاومة فتلية أعلى، حيث سجلت عزوماً نهائية أكبر، كما هو موضح في الجدول (4)، مما يشير إلى سلوك أكثر صلابة وقدرة محسّنة على التشوه اللدن.

تُظهر الأشكال أيضًا تركّزاً ملحوظاً للإجهادات عند الحافتين العلوية والسفلية للمقطع، وخاصة في نموذج العناصر المحددة للجائز المقوى بنظام (TRM) من جانبين، كما هو موضح في الشكل (10). ويُعزى هذا السلوك إلى طبيعة التقييد غير المتصل في حالة التقوية من جانبين، حيث يؤدي غياب الغلاف المستمر من ثلاث جهات على الأقل إلى ظهور مناطق ضعف محلية، تكون أكثر عرضة لانتشار الشقوق الحلزونية الناتجة عن أحمال الالتواء.



الشكل(5) نمط تطور التشققات في الجوائز المرجعية والجوائز المقواة بـ(TRM) وصولاً للانهيار

5-الاستنتاجات والتوصيات:

- **الاستنتاجات:**

1- أظهرت الجوائز المقواة بنظام (TRM) (خصوصاً من ثلاث جهات) زيادة واضحة في عزم الانهيار مقارنةً بالجائز المرجعي، حيث وصلت الزيادة إلى ما يقارب 50%، مما يدل على فعالية نظام التقوية في رفع القدرة الفتلية.

2- ساهمت أنظمة التقوية، لا سيما عند التطويق من ثلاث جهات، في تأخير بداية التشقق وتحسين السيطرة على تطور وانتشار الشقوق، وهو ما انعكس في توزيع أكثر انتظاماً وأقل كثافة مقارنة بالنماذج غير المقواة.

3- أبدت الجوائز المقواة، وخصوصاً(BT-1)، قدرة أكبر على التشوه بعد مرحلة الخضوع دون حدوث انهيار مفاجئ، مما يشير إلى تحسن واضح في السلوك اللدن وزيادة المطاوعة بالمقارنة مع النماذج الأخرى.

4- أظهرت النماذج المقواة من ثلاث جهات أداءً فتلياً أفضل من تلك المقواة من جانبين فقط، ويُعزى ذلك إلى تحسين آلية الربط وتقليل فرص الانفصال أو الانزلاق تحت تأثير تزايد القوى الفتلية.

5- عانت (أظهرت) النماذج ذات التقوية من جانبين فقط تركزاً للإجهادات عند الحواف، مما أدى إلى ظهور مناطق ضعف ساهمت في تسارع انتشار الشقوق الحلزونية، مما يؤكد أهمية الغلاف الكامل (ثلاثي الجوانب) لتحقيق أداء متوازن ومتين.

التوصيات:

1- من خلال نتائج التجارب نوصي بإمكانية استخدام المونة الاسمنتية المقواة بالنسيج ولاسيما البازلتي لتدعيم الجوائز البيتونية المسلحة المعرضة للفتل.

2- اختبار تأثير زيادة عدد طبقات النسيج البازلتي على المقاومة الفتلية للجوائز البيتونية المسلحة.

المراجع العلمية:

1- ΑΒΑΘΥΣ, ς 6.14. ΑΒΑΘΥΣ/Στανδαρδ Υσερэσ Μανυαλ 2014 **ΑΒΑΘΥΣ Ινχ**, ΥΣΑ.

2- Al KHADOR, H; TARSHA, I; Al ALAMODI, S 2023 Experimental study of the effect shape of strengthen with ferrocement for external beam-column joint. **TISHREEN UNIVERSITY JOURNAL FOR RESEARCH AND SCIENTIFIC STUDIES**, ςολ. 45, No. 4, 454-473(In Arabic).

3- ΕΛΣΑΝΑΔΕΔΨ, Μ. Η; ΑΛΜΥΣΑΛΛΑΜ, Η. Τ; ΑΛΣΑΨΕΔ, Η. Σ; ανδ ΑΛ ΣΑΛΛΟΥΜ, Α. Ψ 2013 Φλεξυραλ στρενγτηενινγ ο φ ΡΧ βεαμσ υσινγ τεξτιλε ρεινφορχεδ μορταρ □ Εξπεριμεντα λ ανδ νυμεριχαλ στυδψ, **ΕΛΣΕςΙΕΡ ϑΟΥΡΝΑΛ∀ΕΝΓΙΝΕΕΡΙ ΝΓ ΣΤΡΥΧΤΥΡΕΣ∀** , ςολ. 97, ΠΠ 40□55.

4- ΗΥΔΗΑΙΦΑ, Φ.Ι ; ΣΑΑΔ, Μ.Ρ; ΜΥΨΑΣΣΕΡ, Μ.ϑ 2025 ΤΡΜ ϖ ερσεσ ΦΡΠ ιν τορσιοναλ στρενγτηενινγ οφ ΡΧ βεαμσ, **ΕΛΣΕς ΙΕΡ ϑΟΥΡΝΑΛ∀ΧΟΜΠΟΣΙΤΕΣ ΠΑΡΤ Χ :ΟΠΕΝ ΑΧΧΕΣΣ∀** . ηττπσ://ωωω.σχιενχεδιρεχτ.χομ/σχιενχε/αρτιχλε/πιι/Σ2666682024001221

5- ΛΟΡΕΤΟ, Λ; ΛΟΡΕΝΖΟ, Δ; ΝΑΝΝΙ, Α 2014 Περφορμανχε οφ ΡΧ σλαβ−τψπε ελεμεντσ στρενγτηενεδ ωιτη φαβριχ−ρεινφορ χεδ χεμεντιτιουσ−ματριξ χομποσιτεσ, **ϑΟΥΡΝΑΛ ΟΦ ΧΟΜΠ ΟΣΙΤΕΣ ΦΟΡ ΧΟΝΣΤΡΥΧΤΙΟΝ** , ΔΟΙ: 18. 10.1061/(ΑΣΧΕ)ΧΧ. 1943−5614.0000415

6- ΜΑΣΟΟΔ, Φ; ΚΗΑΝ, Α.Ρ 2016 Στρενγτηενιν οφ ρεινφορχεδ χ ονχρετε βεαμσ ωιτη τεξτιλε ρεινφορχεδ μορταρ(ΤΡΜ) ιν φλε ξυρε ,**ΕΛΣΕςΙΕΡ ϑΟΥΡΝΑΛ∀ΧΟΝΣΤΡΥΧΤΙΟΝ ΑΝΔ ΒΥΙΛΔΙ ΝΓ ΜΑΤΕΡΙΑΛΣ∀**, ΠΠ 533−542.

7- ΣΑΚΕΡ, Α.Μ; ΣΛΕΕΜΑΗ, Α.Α; ΚΗΑΛΙΦΑΗ, Μ.Τ; ανδ ΒΟΥΡ ΝΑΣ Δ.Α 2020 Μοδελλινγ οφ ΡΧ βεαμσ στρενγτηενεδ ωιτη ΤΡ Μ ιν σηεαρ, **ΙΝΤΕΡΝΑΤΙΟΝΑΛ ϑΟΥΡΝΑΛ ΦΟΡ ΡΕΣΕΑΡΧΗ Ι Ν ΜΕΧΗΑΝΙΧΑΛ & ΧΙςΙΛ ΕΝΓΙΝΕΕΡΙΝΓ** , ςολ. 6, No. 12.

8– ΤΑΗΑ, Ρ; ΑΛ ΑΛΛΑΦ, Μ; ΤΑΡΣΗΑ, Ι 2024 Εφφεχτ οφ φερροχ εμεντ ωιτη στψρενε βυταδιενε ρυββερ χοννεχτιον ον χονχρε τε βεαμσ υνδερ τορσιοναλ ιμπαχτ. ϑΟΡΔΑΝ ϑΟΥΡΝΑΛ οφ ΧΙϛΙΛ ΕΝΓΙΝΕΕΡΙΝΓ, ϛολ.18, No. 3.

9– ΤΑΗΑ, Ρ; ΑΛ ΑΛΛΑΦ, Μ; ΤΑΡΣΗΑ, Ι 2024 Εξπεριμενταλ ανδ Αναλψτιχαλ Εϖαλυατιον το Στρενγτηενεδ Ρ.Χ Βεαμσ Υσινγ Φερροχεμεντ Υνδερ Τορσιον . ΣΤΕΠ ΦΟΡ ΧΙϛΙΛ, ΧΟΝΣΤΡΥΧΤΙΟΝ ΑΝΔ ΕΝϛΙΡΟΜΕΝΤΑΛ ΕΝΓΙΝΕΕΡΙΝΓ(ΣΣΧΧΕ), ϛολ.2 , Ισσυε. 3, ππ 9–17.