

دراسة تجريبية وتحليلية لتأثير استخدام الخرسانة المنتجة من الركام المعاد تدويره على الجوائز الخرسانية المسلحة المعرضة للقتل

فلاح علي مبارك* منيب العلاف** إحسان الطرشة***

(الإيداع: 3 آب 2023، القبول: 1 تشرين الثاني 2023)

الملخص:

تم في هذا البحث إجراء دراسة لتحديد أثر الركام المعاد تدويره على الخصائص الميكانيكية للخرسانة المنتجة منه كمقاومة الضغط ومعامل المرونة ومقاومة الشد. تم إجراء دراسة تجريبية وتحليلية لسلوك الجوائز الخرسانية المسلحة المعرضة للقتل في جميع حالات الاستبدال الكامل والجزئي وفق النسب الاتية (0%-25%-50%-75%-100%). بينت الدراسة الحالية تأثير الخواص الميكانيكية المدروسة بوجود الركام المعاد تدويره، وأظهرت النتائج التجريبية على عينات خرسانية أسطوانية أبعادها (15*30) سم وبعمر 120 يوماً انخفاضاً في المقاومة الاسطوانية على الضغط بنسبة تتراوح بين (3.8%-18.4%)، وانخفض معامل المرونة E_c بنسبة تتراوح بين (10.3%-26.9%)، مقاومة الشد بالفلق انخفضت بنسبة تتراوح بين (15.4%-25.8%)، ذلك بزيادة نسبة الركام المعاد مقارنةً مع العينات المرجعية المكونة من الركام الطبيعي R_0 . أجريت دراسة تجريبية بتطبيق عزم القتل على الجوائز الخرسانية المسلحة مكونة من الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره للمجموعات (R100-R75-R50-R25-R0)، وأظهرت النتائج أن عزم القتل الأعظمي الواسطي لثلاثة جوائز من كل مجموعة انخفض بنسبة (8.9%-13.1%-20.4%-26.7%) مقارنةً بالجوائز الخرسانية المسلحة المكونة من الركام الطبيعي (R0). وأعطت النتائج التحليلية توافق جيد مع النتائج التجريبية من حيث توزيع وشكل الشقوق، وأظهرت النتائج أن نسبة الفرق في عزم القتل الأعظمي بين التجريبي والتحليلي تتراوح بين (4%-5.7%)، ونسبة الفرق بزوايا القتل تتراوح بين (4.8%-11.6%) لكل المجموعات.

كلمات مفتاحية: الركام الطبيعي، الركام المعاد تدويره، مقاومة الشد بالفلق، الجوائز الخرسانية المسلحة، عزم القتل.

*طالب دراسات عليا (دكتوراه) المهندس: - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث
** أستاذ دكتور في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث
*** أستاذ دكتور في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث

An experimental and analytical study of the effect of using concrete produced from recycled aggregates on reinforced concrete beams subjected to torsion

Falah Ali Mubarak* Munib Al–Allaf ** Ihsan Tarsha ***

(Received: 3 August 2023, Accepted: 1 November 2023)

Abstract:

In this research, a study was conducted to determine the effect of recycled aggregates on the mechanical properties of concrete produced from it such as compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength. An experimental and analytical study was conducted on the behavior of reinforced concrete beams subject to torsion in all cases of complete and partial replacement according to the following ratios (0%–25%–50%–75%–100%). The current study showed that the studied mechanical properties were influenced by the presence of recycled aggregates, and the experimental results showed a decrease in the cylindrical resistance to pressure by a rate ranging between (3.8%–18.4%), and a decrease in the elastic modulus E_c by a rate ranging between (10.3%–26.9%), and the tensile strength by splitting decreased by a rate ranging between (15.4%–25.8%), with an increase of Reconstituted aggregates compared with reference samples composed of (R0) natural aggregates. An experimental study was conducted by applying the torsional torque on reinforced concrete beams composed of natural aggregates and recycled aggregates of groups (R0,R25,R50,R75,R100) and the results showed that the average maximum torsional torque of three beams of each group decreased by (8.9%–13.1%–20.4%–26.7%) compared to reinforced concrete beams composed of natural aggregates (R0). The analytical results gave a good agreement with the experimental results in terms of the distribution and shape of the cracks, and the results showed that the percentage difference in the maximum torsion moment between the experimental and the analytical ranged between (4%–5.7%), and the difference in the angle of torsion ranged between (4.8%–11.6%) for all groups.

Key words: Recycled aggregate, Natural aggregates, splitting tensile strength, reinforced concrete beams, torsion moment, Angle of twist.

*Graduate Student (PhD) Engineer: – Department of Structural Engineering – Faculty of Civil Engineering – Al–Baath University

**Professor in the Department of Structural Engineering – Faculty of Civil Engineering – Al–Baath University

***Professor in the Department of Structural Engineering – Faculty of Civil Engineering – Al–Baath University

المقدمة:

تعتبر الخرسانة من أهم مواد البناء لما لها من ميزات إيجابية ولا سيما كونها مادة بناء رخيصة ومحلية، وفي السنوات الأخيرة تزايدت حركة هدم وإعادة إعمار المباني بغرض ملائمة أغراض جديدة أو بسبب انتهاء العمر التصميمي للمباني أو بسبب الحروب التي تمر فيها بعض الدول مما أدى إلى تراكم كميات كبيرة من المخلفات والتي تشكل الخرسانة جزءاً كبيراً منها، فأصبح ذلك تحدياً جديداً للبيئة والمجتمع، حيث يقدر استعمال الخرسانة بحوالي 55 بليون طن للعام 2020 في العالم. [5]، [19]

ولكن يقابل تلك الزيادة في الطلب لاستعمال وإنتاج الخرسانة، نقص في المواد الأولية الجيدة المحدودة على أرضنا، ونظراً لظروف الحرب التي عاشتها بعض الدول العربية مثل سوريا، أدت إلى هدم الأبنية وتراكم هذه الأنقاض وهي غير صديقة للبيئة، كما موضح في الشكل (1) صور المباني والنفايات الخرسانية في سوريا واليمن، من هنا نشأت فكرة إعادة تدوير وإعادة استعمال الخرسانة القديمة في إنتاج الخرسانة الجديدة وكيفية التخلص من الركام ومخلفات الخرسانة القديمة. [26]



الشكل رقم (1): صور المباني والنفايات الخرسانية في سوريا واليمن

1- المشكلة العلمية ومبررات البحث:

نتيجة لظروف الحرب الغاشمة على سوريا وبعض الدول أدت إلى تهديم عدد كبير من المباني وخلفت ورائها نفايات خرسانية كثيرة، وعلاج هذا الوضع هو إعادة تدوير هذه النفايات واستخدامها مرة أخرى. [26] إن محور هذا البحث هو الاستفادة بالشكل الأفضل من هذه النفايات واستخدامها في العناصر الإنشائية كاستبدال كلي، ومن ضمن هذه العناصر الجوائز الخرسانية المسلحة.

2- هدف البحث:

دراسة الخصائص الميكانيكية للخرسانة المكونة من الركام المعاد تدويره وفق النسب (0%، 25%، 50%، 75%، 100%) وكذلك دراسة تجريبية وتحليلية لسلوك الجوائز الخرسانية المسلحة المعرضة للقتل وفق النسب المذكورة ومقارنتها بالعينات المرجعية المكونة من الركام الطبيعي.

3- الدراسات المرجعية:

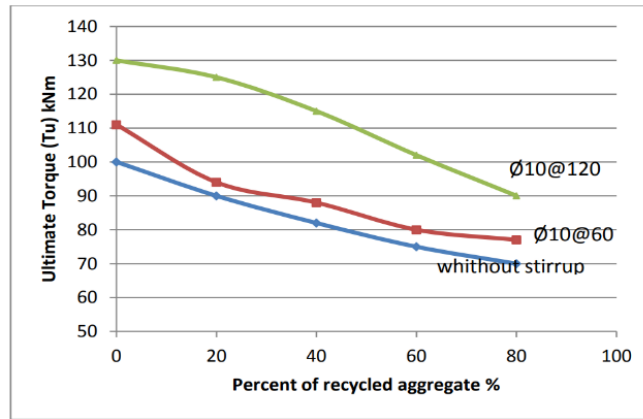
سوف نستعرض بعض النتائج التي توصلت إليها بعض الدراسات المرجعية المتعلقة بالركام المعاد تدويره:

1- قام الباحث [Park (1999)] [18] بدراسة أثر عمر الخرسانة المعاد تدويرها حيث تم اعتماد نوعين من الركام المعاد تدويره الأول مصدره خرسانة حديثة الصب تم تكسيرها بعمر 28 يوماً، والثاني ركام مصدره نفايات خرسانية قديمة استخدم هذين النوعين في إنتاج خلطات خرسانية وتم مقارنة بعض المواصفات الميكانيكية مع خرسانة نموذجية منتجة من ركام

طبيعي، في كل خلطة تم استخدام عيارين للإسمنت (250 kg/m^3 - 350 kg/m^3) لدراسة أثر زيادة الاسمنت على المواصفات الميكانيكية، وأظهرت النتائج أن الخرسانة المكونة من الركام المعاد تدويره أضعف من الخرسانة المكونة من الركام الطبيعي بغض النظر عن مصدر الركام، لكن أبدت الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره من خرسانة قديمة أداءً أفضل من الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره من خرسانة حديثة الصب حيث انخفضت مقاومة الضغط بنسبة 16% للخرسانة القديمة و25% للخرسانة الحديثة الصب بالمقارنة مع الخرسانة المكونة من الركام الطبيعي، أيضاً بينت هذه الدراسة أن زيادة محتوى الاسمنت يحسن من المواصفات الميكانيكية مثل المقاومة على الضغط، معامل المرونة وغيرها.

2- أجرت الباحثة [بشرى العكاري] (2021) [25] خلطات خرسانية بنسب استبدال 0%-25%-50%-75%-100% وتوصلت إلى أن المقاومة الاسطوانية الوسطية على الضغط تقل بزيادة نسبة الاستبدال للركام المعاد تدويره حيث انخفضت بنسبة 11.1%- 7.48%- 15.84%- 18.88% على التوالي وفقاً لنسب الاستبدال المذكورة بالمقارنة مع العينات المرجعية المكونة من الركام الطبيعي.

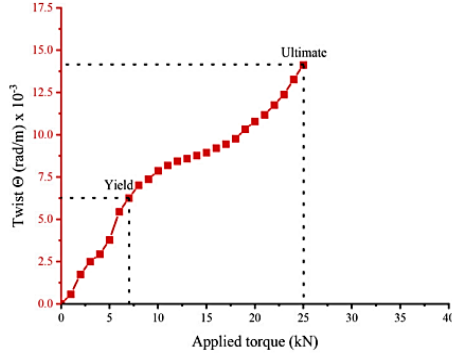
3- درس الباحث [Aqeel H. Chkheiw...et al] (2021) [6] دراسة تجريبية للجوائز الخرسانية المسلحة والمعرضة للقتل عددها 15 جائزاً بأبعاد ($1300*300*300$) مم، وكانت متغيرات البحث هي نسبة التسليح الأولى: التسليح الطولي 4T6 وبسليح عرضي $\Phi 10/60\text{mm}$ ، والثانية: التسليح الطولي 4T12 وبسليح عرضي $\Phi 10/120\text{mm}$ ونسبة استبدال الركام المعاد تدويره (0،20،40،60،80) %، وتوصل الباحث انه كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره كلما قل عزم القتل بنسبة تتراوح بين (10-30) %، وتوصل أيضاً أنه كلما زادت نسبة التسليح زاد عزم القتل بنسبة 15.4% يوضح الشكل (2) مخطط يربط بين عزم القتل T_u ونسب الاستبدال (0،20،40،60،80) %.



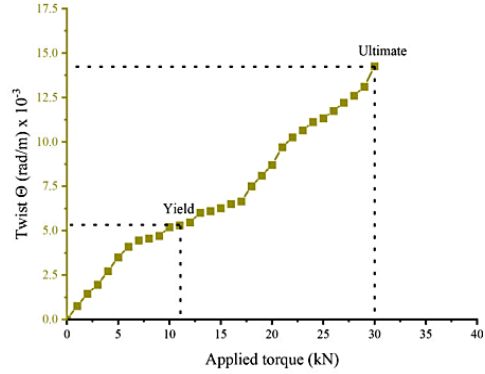
الشكل رقم (2): مخطط عزم القتل ونسبة الاستبدال [6]

4- درس الباحث [M. Prakash,...et al] (2023) [20] دراسة تجريبية لسلم الجوائز الخرسانية المسلحة والمعرضة لعزوم قتل، وهذ الجوائز بأبعاد ($230*300*2000$) مم، ومسلحة بتسليح طولي 4T12، وتسليح عرضي $\Phi 8/150\text{mm}$ وكان متغير الدراسة هو زاوية ميل الإسورة العرضية (45° ، 75° ، 80° ، 90°).

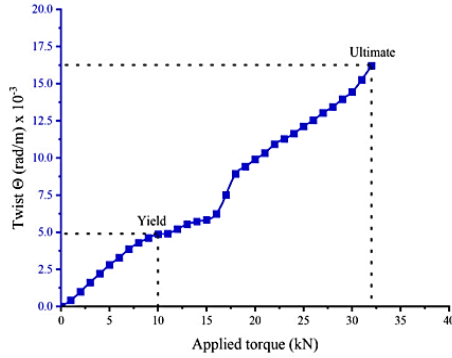
وكانت نتائج الدراسة ان قيمة عزم الفتل الأعظمي هي (25،30،32،27) وفقاً لزاوية ميل الإسورة العرضية بالترتيب (90° ، 80° ، 75° ، 45°)، كما يوضح الشكل (3) مخطط عزم الفتل وزاوية الفتل للنماذج حسب زاوية ميل الإسورة، وتوصل الباحث إلى انه عندما تكون زاوية ميل الإسورة العرضية 75 أعطت قيمة عزم فتل أعلى وكذلك زاوية فتل أعلى.



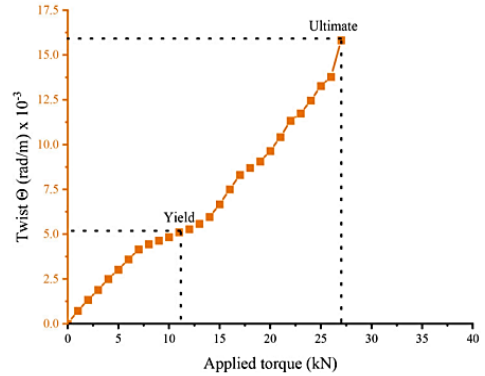
(a) Torque Versus Twist for B1 Specimen (90°)



(b) Torque Versus Twist for B2 Specimen (80°)



(c) Torque Versus Twist for B3 Specimen (75°)



(d) Torque Versus Twist for B4 Specimen (45°)

الشكل رقم (3): مخطط عزم الفتل وزاوية الفتل للنماذج [20]

4- المواد المستخدمة في البحث:

5-1 الاسمنت:

تم استخدام اسمنت بورتلاندي عادي (ماركة الإسمنت 32.5Mpa) وعياره 400 kg/m^3 .

5-2 الملدن:

الملدن المستخدم في هذا البحث (Hyperplast ES901) وهو عالي الأداء، موافق للمواصفات ASTM C494, Type G، وتم تحديد قابلية التشغيل على عدد من الخلطات التجريبية، وبناء عليها تم اعتماد نسب الملدن الآتية: (0.5%، 0.5%، 1%، 1%، 1.5%) من وزن الاسمنت للنسب الاستبدال: 0%، 25%، 50%، 75%، 100% بالترتيب، تم إضافتها إلى الماء أثناء جيل مكونات الخلطات.

5-3 الركام الطبيعي:

من أجل الحصول على خليط يحقق المواصفة ASTM C33 تم إجراء تجربة التحليل الحبي في مخبر مواد البناء -كلية الهندسة المدنية-جامعة البعث-سوريا لثلاثة أنواع من البحص الطبيعي وتم الحصول على النسب النهائية الآتية: 37% بحص خشن، 23% بحص ناعم، 27% رمل مكسر (زرادة)، 13% رمل ناعم وذلك من أجل تصميم الخلطة.

5-4 الركام المعاد تدويره:

إن الركام المعاد تدويره الذي يحتوي على أي نوع من نفايات أخرى يجب الفصل بعدة طرق منها:

- الفصل الكهرومغناطيسي: يتم فصل فولاد التسليح الموجود بالمخلفات الخرسانية بواسطة مغناطيس، يتم تركيبه عبر الأحزمة الناقلة في الكسارات الرئيسية والثانوية.
- الفصل الجاف: حيث يتم إزالة الجزيئات الأخف وزناً من المواد الحجرية، باستخدام تيار هوائي (Air-sifting) قوي لكن استخدام هذا النوع يسبب الكثير من الغبار.
- الفصل الرطب: يستخدم هذا النوع من أجل إزالة المخلفات المنخفضة الكثافة بواسطة المياه، وينتج باستخدام هذه الطريقة ركام نظيف جداً.

إذا كان الركام يحتوي على نفايات عضوية يتم الفصل بإحدى الطرق السابقة أو عن طريق تعريض الركام للحرارة حتى تتطاير المواد العضوية.

في هذا البحث كانت الصعوبة في الحصول على نفايات المباني منخله ومفروزة جاهزة لأنه لا توجد في سورية حتى الآن وحدات وآليات متخصصة تقوم بإعادة تدوير نفايات المباني ولا يتوفر آليات متطورة تقوم بعملية التكسير والفرز بحيث نحصل على نوعية مناسبة. [26]

وبعد البحث تم الحصول على نفايات المباني في حمص-سوريا وتم فرزها يدوياً واخذها إلى كسارة خاصة في الصناعة-حمص - سوريا تم تكسيرها و ثم فرزها بمخبر مواد البناء - كلية الهندسة المدنية- جامعة البعث كما موضح في الشكل (4).



الشكل رقم (4): صورة الكسارة المستخدمة والركام بعد التكسير والفرز

وبعد عملية فرز الركام المعاد تدويره بالمناخل في المخبر دون غسله أو تنقيعه بالماء وتم الحصول على ثلاثة أنواع من البحص وهي: بحص خشن حسب مقياس المنخل (16-25) mm، وبحص ناعم حسب مقياس المنخل (4.75-16) mm، رمل مكسر (زرادة) حسب مقياس المنخل (1.18-4.75) mm، وبعد اجراء التحليل الحبي لركام المعاد تدويره وذلك للحصول على خليط يحقق المواصفة ASTM C33 تم اخذ النسب النهائية الآتية لتصميم الخلطة: 28% بحص خشن، 34% بحص ناعم، 21% رمل مكسر (زرادة)، 17% رمل ناعم.

تم اختبار جميع المواد اللازمة لإنجاز العمل التجريبي حيث تم تعيين الصفات الفيزيائية والميكانيكية مثل الوزن النوعي G، والوزن الحجمي γ ، والمكافئ الرمل E.s الذي كان قيمته 71.4%.

يوضح الجدول (1) أوزان المواد المستخدمة في البحث للمتر المكعب الواحد المكون من الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره.

الجدول رقم (1): أوزان المواد المستخدمة في البحث للمتر المكعب الواحد

نسبة الركام المعاد تدويره %					الواحدة	نوع الركام
R100	R75	R50	R25	R0		
-	180.52	361.05	541.57	722.09	Kg/m ³	بحص طبيعي خشن
-	113.31	226.61	339.92	453.22	Kg/m ³	بحص طبيعي ناعم
-	130.41	260.82	391.22	521.63	Kg/m ³	رمل مكسر طبيعي
529.96	397.47	264.98	132.49	-	Kg/m ³	بحص معاد تدويره خشن
643.52	482.64	321.76	160.88	-	Kg/m ³	بحص معاد تدويره ناعم
390.55	292.91	195.28	97.64	-	Kg/m ³	رمل مكسر معاد تدويره
306.03	288.03	270.03	252.02	234.02	Kg/m ³	رمل ناعم
400	400	400	400	400	Kg/m ³	اسمنت نوع اول
200	200	200	200	200	Kg/m ³	ماء
%50	%50	50%	%50	%50	%	نسبة الماء للإسمنت w/c

المقارنة بين الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره:

- الوزن النوعي: الوزن النوعي للركام المعاد تدويره أقل من الوزن النوعي للركام الطبيعي وهذا يتوافق مع ما توصلت إليه بعض الدراسات المرجعية [3]، [16]، [2].
- نتائج الاهتراء: إن فاقد الاهتراء للركام الطبيعي هو 20.13% بينما كان للركام المعاد تدويره 31.53%، ونلاحظ ان الفاقد بحسب اختبار لوس انجلوس للركام معاد تدويره اقل من الركام الطبيعي بسبب المونة القديمة الملتصقة والتي تتفتت بشكل أسهل، بحسب (الكود العربي السوري، 2018) [23] فإن الحد الأعلى المسموح به للفاقد في اختبار لوس انجلوس هو 40% وبالتالي فإن الركام صالح لإنتاج الخلطات الخرسانية.
- الامتصاص: إن قدرة الركام المعاد تدويره على الامتصاص 5.11% أكبر بشكل واضح من قدرة الركام الطبيعي على الامتصاص 1.16% وذلك بسبب المونة القديمة الملتصقة على سطح الركام المعاد تدويره والتي تحوي على نسبة مسامات عالية وهذا يتوافق مع الدراسات المرجعية [16]، [21].

5-5 فولاذ التسليح:

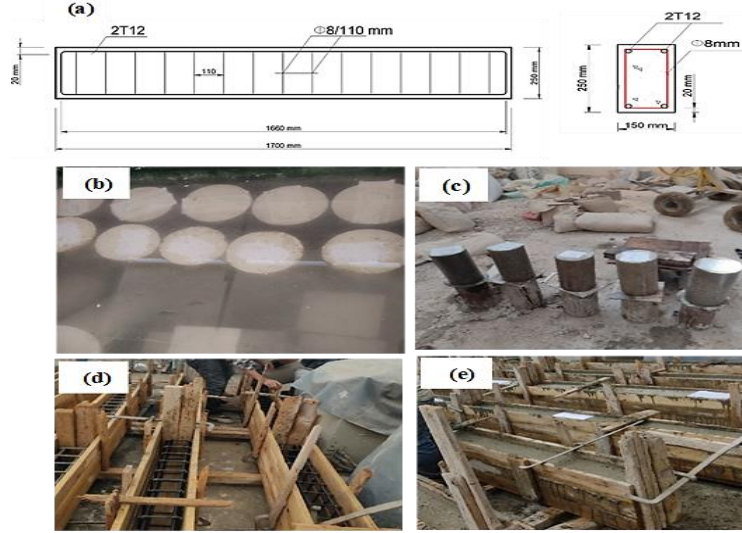
يبين الجدول (2) خصائص فولاذ التسليح حد المرونة، وحد الانقطاع الوسطي لثلاث عينات من فولاذ التسليح تم اختبارها بمخبر مواد البناء – كلية الهندسة المدنية – جامعة البعث.

الجدول (2): خصائص فولاذ التسليح المستخدم في البحث

القطر ب mm	حد المرونة Mpa	حد الانقطاع Mpa
12	540	694.67
8	425	551.6

5- العينات والجوائز المختبرة في البحث:

تم صب ستون عينة اسطوانية بأبعاد (30*15) cm، وخمسة عشر جائزاً خرسانياً بأبعاد (25*15*170) cm، ومسلح بتسليح طولي 4T12mm وتسليح عرضي (Φ8/100mm)، كما يوضح الشكل (5).



الشكل رقم (5): (a): تفصيل التسليح للجائز، (b): العينات الاسطوانية في حوض الماء

(c): العينات الاسطوانية بعد فكها من القوالب، (d): فولاذ التسليح ضمن الكوفراج الخشبي،

(e): الجوائز المصبوبة

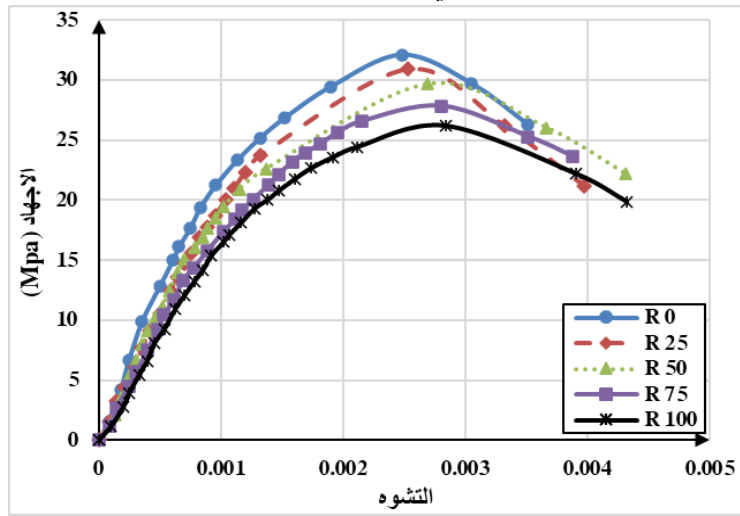
6-1 اختبارات العينات:

تم اعتماد المواصفات الامريكية ASTM C 39-72 لتحديد المقاومة على الضغط، وباستخدام جهاز الكسر الموجود في مخبر الخرسانة -كلية الهندسة المدنية-جامعة البعث تم كسر عينتين اسطوانيتين من كل نسبة استبدال بعمر 7 يوماً، وثلاث عينات اسطوانية من كل نسبة استبدال بعمر 28 يوماً، وأربع عينات اسطوانية من كل نسبة استبدال بعمر 120 يوماً، وتم تعيين مخطط (الاجهاد- التشوه) وفق المواصفات الامريكية ASTM C469، وتم اختبار عينتين اسطوانيتين من كل نسبة استبدال على اجهاد الشد بالفلق حسب المواصفة ASTM C496 / C496M -11، وكما يوضح الشكل (6) جهاز كسر العينات، والعيينة الاسطوانية بعد الانهيار، والعيينة الاسطوانية المعرضة لشد بالفلق.



الشكل رقم (6): اختبارات العينات الاسطوانية (a): العينة المعرضة للضغط
(b): شكل العينة بعد الانهيار، (c): العينة المعرضة لإجهاد الشد بالفلق
(d): شكل العينة بعد الانهيار على الفلق

ويبين الشكل (7) مخطط (الاجهاد- التشوه) الوسطي للعينات الأربع المختبرة تجريبياً بعمر 120 يوماً.



الشكل رقم (7): مخطط (الاجهاد- التشوه) الوسطي للعينات المختبرة

يبين الجدول (3) القيم الوسطية لـ (مقاومة الاسطوانية على الضغط بعمر 120، 28، 7 day، ومعامل المرونة E_c ، والوزن الحجمي، ومقاومة الشد بالفلق f_{sp} التي تحسب من المعادلة (1) [23].

الجدول رقم (3): ملخص نتائج التجارب على العينات الاسطوانية المختبرة

120 يوم			28 يوم	7 يوم	المجموعة
الوزن الحجمي Kg/m ³	معامل المرونة Ec Mpa	المقاومة على الشد بالفلق Mpa	المقاومة الاسطوانية على الضغط Mpa	المقاومة الاسطوانية على الضغط Mpa	
2397.46	25664.91	2.98	32.11	29.81	R0
2376.71	23012.15	2.52	30.89	27.87	R25
2369.17	22050.33	2.5	29.66	26.85	R50
2348.42	20280.13	2.33	27.83	25.13	R75
2335.22	18748.3	2.21	26.2	24.71	R100

$$f_{sp} = \frac{2 * P}{\pi * d * L} \quad (1)$$

حيث:

P: هي أقصى حمل تتحمله العينة الاسطوانية.

d: قطر العينة الأسطوانية d=150mm.

L: طول العينة الاسطوانية L=300mm.

ونلاحظ مما سبق إن المقاومة المميزة الأسطوانية بعمر 120 يوم تتخفض مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره، حيث كانت نسب الانخفاض كالاتي: (3.8%-7.6%-13.33%-18.41%) وفقاً لنسب الاستبدال بالترتيب (R100-R75-R50-R25) مقارنة بالمقاومة الاسطوانية للعينات المكونة من الركام الطبيعي (R0)، ونلاحظ من الشكل (7) أن شكل المخطط في حالة نسب الاستبدال مشابه للمخطط الركام الطبيعي مع انخفاض في الذروة وزيادة التشوهات المحورية في الفرع الهابط بزيادة نسبة الركام معاد تدويره.

ونلاحظ من الجدول (3) انخفاض في مقاومة الشد بالفلق بزيادة نسبة الركام المعاد تدويره وكانت نسبة الانخفاض تتراوح بين (15.4%-25.8%)، ونلاحظ انخفاض في الوزن الحجمي مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره بنسبة تتراوح بين (0.9%-2.6%)، ونلاحظ أيضاً انخفاض في معامل المرونة Ec مع زيادة نسبة الركام المعاد تدوير وكان هذا الانخفاض واضح كان بنسبة (10.3%، 14.1%، 20.98%، 26.95%) عند نسب الاستبدال الاتية بالترتيب (R100-R75-R50-R25) مقارنة بالركام الطبيعي (R0)، وإن الانخفاض الواضح لمعامل المرونة مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره يعود إلى التشوه الكبير للعينة عند تعرضها للضغط بالمقارنة مع العينات المكونة من الركام الطبيعي، وذلك بسبب وجود المونة الإسمنتية القديمة على سطح حبات البحص والتي تحوي مسامات بنسبة عالية فتعطيها هذه الخاصية، لذلك كلما كانت حبات البحص مغلقة بكمية أكبر بالمونة الاسمنتية كلما كان مقدار الانخفاض لمعامل المرونة أكبر، وهذا ما يتوافق مع بعض الدراسات المرجعية [13]، [14]، [22].

• الدراسة النظرية لمعامل المرونة (Modulus of Elasticity)

تم مقارنة قيم معامل المرونة التجريبي مع النظري حسب بعض علاقات الكودات العالمية المعتمدة كما يلي:

- الكود العربي السوري (2018) [23]:

يمكن حساب معامل المرونة من العلاقة الآتية:

$$E_c = 5700 * \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

حيث: f'_c المقاومة الأسطوانية بـ MPa.

- الكود الأوروبي (BS EN 1991-1) [7]:

يمكن حساب معامل المرونة من العلاقة الآتية:

$$E_c = 22 * \left(\frac{f'_c}{10}\right)^{0.3} \quad (3)$$

حيث: f'_c المقاومة الأسطوانية بـ MPa.

- الكود البريطاني (BS - 8110 1985) [8]:

يمكن حساب معامل المرونة من العلاقة الآتية:

$$E_c = 1.7 * 10^{-6} * \rho^2 * f'_c^{0.33} \quad (4)$$

حيث:

f'_c المقاومة الأسطوانية بـ MPa، ρ : الوزن الحجمي بـ kg/m³.

- الكود الأمريكي (ACI-318-1992) [4]:

يمكن حساب معامل المرونة من العلاقة الآتية:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

حيث: f'_c المقاومة الأسطوانية بـ MPa

- الكود المصري (ECP-2017) [24]:

يمكن حساب معامل المرونة من العلاقة الآتية:

$$E_c = 4400 * \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

حيث: f'_c المقاومة الأسطوانية بـ MPa، ρ : الوزن الحجمي بـ Kg/m³.

يبين الجدول (4) قيم معامل المرونة المحسوبة وفقاً لعلاقات بعض الكودات المذكورة ومقارنتها مع القيم التجريبية، وقيم المقاومات الاسطوانية (f'_c) والوزن الحجمي (ρ) المذكورة في الجدول (3)، وذلك وفق نسب الاستبدال الآتية: (100-75-50-25-0) %.

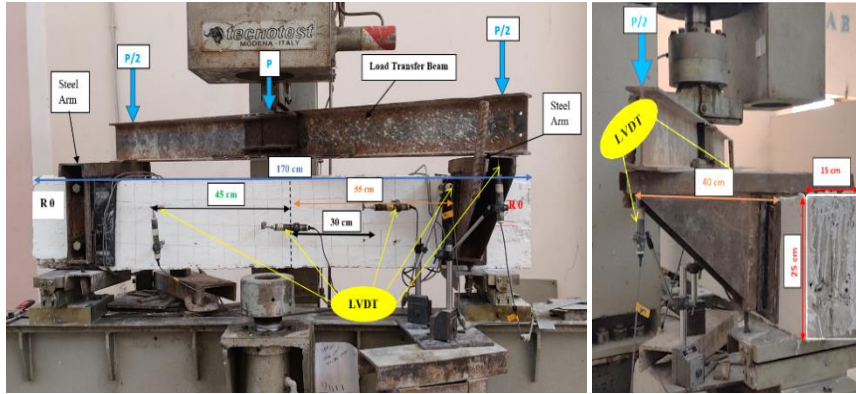
الجدول رقم (4): قيم معامل المرونة التجريبية والنظرية وفقاً لبعض الكودات

Ec (GPa)						اسم الكود المجموعة
القيم التجريبية	المصري ECP	الأوروبي BS EN -1	البريطاني BS-8110	الأمريكي ACI-318	العربي السوري	
25.66	24.93	31.22	30.70	26.63	32.30	R0
23.01	24.46	30.86	29.79	26.12	31.68	R25
22.05	23.96	30.48	29.20	25.60	31.04	R50
20.28	23.21	29.91	28.10	24.80	30.07	R75
18.75	22.52	29.37	27.24	24.06	29.18	R100

نلاحظ من الجدول السابق أن معامل المرونة المحسوب من علاقتي الكود الأمريكي (ACI-318)، والكود المصري (ECP-2017) كانت قريبة من القيم التجريبية من أجل الخلطة المكونة من الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره، أما بقية الكودات بعضها غير مناسبة لحساب معامل المرونة في حالة الخرسانة المكونة من الركام المعاد تدويره وخاصة تلك التي يقدمها الكود السوري حيث أعطت أعلى القيم بالمقارنة مع باقي علاقات الكودات الأخرى.

2-6 الدراسة التجريبية للجوائز المختبرة:

تم تطبيق عزم الفتل على الجوائز الخرسانية المسلحة باستخدام جهاز التحميل (كسر الجوائز) الموجود في مخبر الخرسانة - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث، والذي يعطي قوة تحميل حتى 1000 KN كما موضح في الشكل (8).



الشكل رقم (8): تجربة تحميل الجوائز باستخدام جهاز الكسر في مخبر الخرسانة

ومن أجل تطبيق الفتل تم استخدام بعض الملحقات بجهاز (كسر الجوائز) وهي:

1- الأذرع الفولاذية:

الأذرع التي سنقوم من خلالها بتطبيق مزدوجة الفتل بالاتجاهين، وهي أذرع معدنية، حيث كل ذراع عبارة عن صفحة معدنية بسماكة 4 سم وبعرض 8 سم لتطبيق الحمل وملحومة إلى مقطع معدني حلقي سيتم لفه حول الجوائز وتثبيتته ببراعي في الأسفل، وتم تقوية القطعتين بلحمها إلى صفحة أخرى مثلثة لتأمين الصلابة، حيث تم تفصيل ذراعين معدنيين يوضع

كل منهما بجهة بتماس مباشر مع المساند لتأمين مزدوجة الفتل الصافي، كما تم وضع الحساسات (LVDTs) كما موضح في الشكل (8) مع اخذ الابعاد عن منتصف الجائز.

2- جائز نقل الأحمال:

لنقل الحمل من جهاز الكسر الرئيسي (جهاز كسر الجوائز) إلى ذراعي التحميل تم تصنيع جائز معدني (عارضة معدنية)، وتم تقويته بلحم صفائح معدنية إلى الجسد في المنتصف، أي تحت الحمل الرئيسي تماماً.

النتائج التجريبية للجوائز المختبرة:

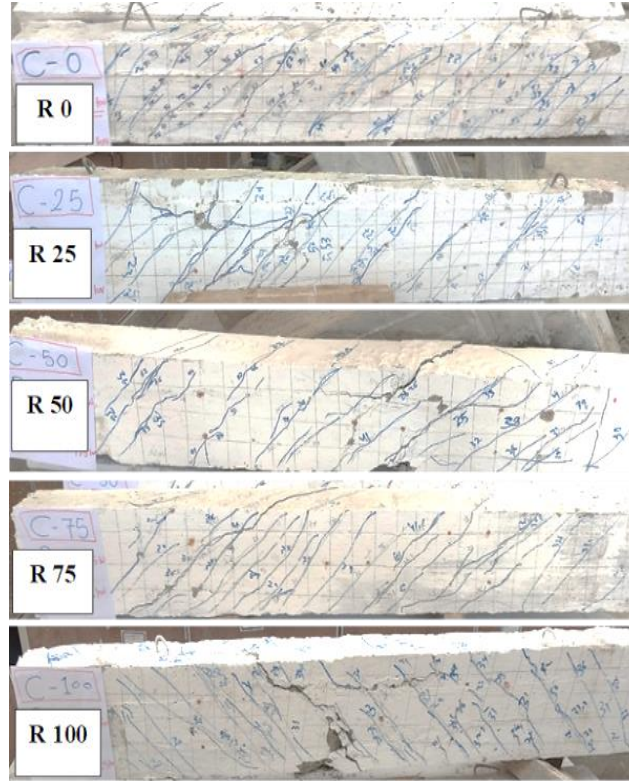
تم تطبيق عزم الفتل على ثلاثة جوائز خرسانية مسلحة من كل مجموعة حسب نسب الاستبدال (-R50-R75-R100) وأبدت هذه الجوائز لكل مجموعة نفس السلوك تقريباً، ونتيجة تطبيق عزم الفتل بدأت الشقوق بالظهور وتطورت هذه الشقوق بشكل قطري لتلتف حول الجائز بشكل حلزوني وبزاوية تقريباً 45° ، ويعد سلوك انهيار الجوائز مثالياً ومثل سلوك مقطع خاضع لعزم فتل.

يبين الجدول (5) القيم الوسطية لعزم الفتل الأعظمي T_u ، وزاوية الفتل الاعظمية θ_u ، وعزم التشقق T_{cr} وزاوية الفتل الموافقة له θ_{cr} للجوائز الخرسانية المسلحة المختبرة.

الجدول رقم (5): ملخص النتائج التجريبية

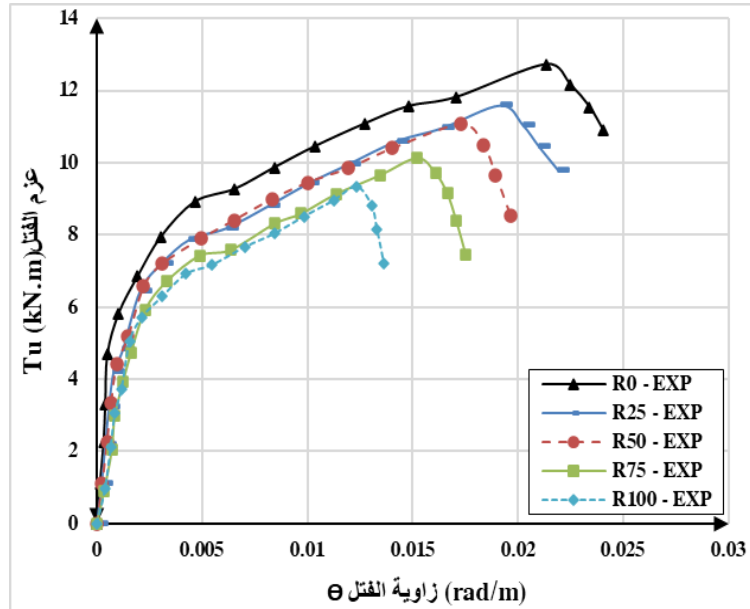
المجموعة	T_{cr} KN.m	T_u KN.m	$\frac{T_u}{T_u (R0)}$	θ_{cr} rad/m	θ_u rad/m	$\frac{\theta_u}{\theta_u (R0)}$
R0	5.78	12.73	1	0.00242	0.0213	1
R25	4.82	11.59	0.91	0.00184	0.0192	0.9
R50	4.53	11.06	0.87	0.00153	0.0172	0.81
R75	3.93	10.13	0.8	0.00133	0.0153	0.72
R100	3.42	9.33	0.73	0.00114	0.0124	0.58

كما يوضح الشكل (9) شكل الشقوق في الجوائز لكل المجموعات (R100-R75-R50-R25-R0).



الشكل رقم (9): شكل الشقوق في الجوائز المختبرة

ويوضح الشكل (10) مخطط (عزم الفتل T_{exp} - زاوية الفتل θ_{exp}) الوسطي للجوائز المختبرة تجريبياً حيث يعبر كل مخطط القيم الوسطية لثلاثة جوائز مختبرة من كل مجموعة.



الشكل رقم (10): مخطط (عزم الفتل - زاوية الفتل) للجوائز المختبرة تجريبياً.

- مقارنة عزوم الفتل التجريبية مع النظرية وفق علاقات بعض الكودات العالمية:
تم مقارنة قيم عزوم الفتل التجريبية مع النظرية حسب علاقات الكودات العالمية المعتمدة كما موضح في الجدول (6).

الجدول رقم (6): المقارنة بين قيم عزوم الفتل التجريبية والنظرية حسب علاقات الكودات العالمية

الكود الأمريكي (ACI-318) [4]	الكود العربي السوري (2018) [23]
$T_s = \frac{2 * A_0 * A_t * f_{ys} * cont\theta}{S}$ $A_0 = 0.85 * (X - 2 * a) * (Y - 2 * a)$ $T_c = 0.083 * \sqrt{f'_c} * \frac{A_{cr}^2}{P_{cp}}$ $A_{cr} = X_1 * Y_1$ $P_{cp} = 2 * X_1^2 + 2 * Y_1^2$	$\tau_{tu} = \frac{3 * T_u}{\sum X^2 * y}$ $\tau_{tcu} = 0.13 * \sqrt{f'_c}$ $A_{st} = \frac{(\tau_{tu} - \tau_{t0u}) * S * \sum X^2 * y}{3 * \alpha_t * x_1 * y_1 * f_{yt}}$ $A_{l1} = \left(\frac{2.8 * x * S}{f_y} * \left(\frac{\tau_{tu}}{\tau_{tu} + \tau_u} \right) - 2 * a_{st} * \frac{f_{yt}}{f_y} \right) * \frac{(x_1 + y_1)}{S}$
<p>الكود الأوروبي EUROCODE [7]</p> $T_u = \frac{2 * A_k * A_{st} * f_{ys} * cont\theta}{S}$ $A_k = (X - t_{ef}) * (Y - t_{ef})$ $t_{ef} = \frac{X * Y}{2 * (X + Y)}$	$A_{l2} = \left(2 * A_{st} * \frac{f_{yt}}{f_y} \right) * \frac{(x_1 + y_1)}{S}$ $\alpha_t = \left(0.66 + 0.33 * \left(\frac{y_1}{x_1} \right) \right) \leq 1.5$
<p>الكود الأسترالي AS 3600 [9]</p>	<p>الكود الصيني GB 50010-2010 [12]</p>
$T_{su} = \frac{2 * A_t * A_{sw} * f_{ys} * cont\theta}{S}$ $A_t = 0.85 * (X - 2 * a) * (Y - 2 * a)$ $T_{cu} = 0.03 * \sqrt{f'_c} * J_t$ $J_t = 0.4 * X^2 * Y$ $T_u = T_{cu} + T_{su}$	$T_u = T_c + T_s$ $T_c = 0.35 * f_t * w_t$ $w_t = \frac{X^2}{6} * (3 * X - Y)$ $T_s = 1.2 * \sqrt{\zeta} * \frac{A_{st} * f_{yv} * A_{cor}}{S}$
<p>A_{sw}: مساحة مقطع الإسوار، X, Y: عرض وطول مقطع الجائز، S: المسافة بين الاساور، f_{yt}: إجهاد الخضوع للإسوار، P_{cr}: محيط المقطع العرضي، J_t: العزم المقاوم للمقطع العرضي، A_t: مساحة المقطع الحائري للإسوار، f_t: مقاومة الشد للخرسانة، f_y: إجهاد الخضوع للتسليح الطولي، τ_{tu}: الإجهاد المماسي الأعظمي.</p>	

يوضح الجدول (7) عزم الفتل الأعظمي التجريبي $T_{u exp}$ ، وعزم الفتل الأعظمي T_u المحسوب من علاقات الكودات المذكورة في الجدول (6) وفقاً للمجموعات (R100-R75-R50-R25-R0)، ويوضح الجدول (8) نسب الفرق في عزم الفتل الأعظمي T_u بين النتائج التجريبية والنتائج التي تم حسابها وفق علاقات الكودات المذكورة.

الجدول رقم (7): عزم الفتل الأعظمي التجريبي $T_{u exp}$ ، وعزم الفتل الأعظمي T_u وفق الكودات

عزم الفتل الأعظمي T_u (kN.m)						اسم الكود المجموعة
التجريبي $T_{u exp}$	الأسترالي AS3600	الأوروبي EURO	الصيني GB 50010	الأمريكي ACI-318	العربي السوري	
12.73	12.21	8.95	10.88	9.42	8.71	R0
11.59	12.14		10.57	9.40	8.67	R25
11.06	12.07		10.56	9.38	8.62	R50
10.13	11.95		10.44	9.35	8.55	R75
9.33	11.84		10.36	9.32	8.49	R100

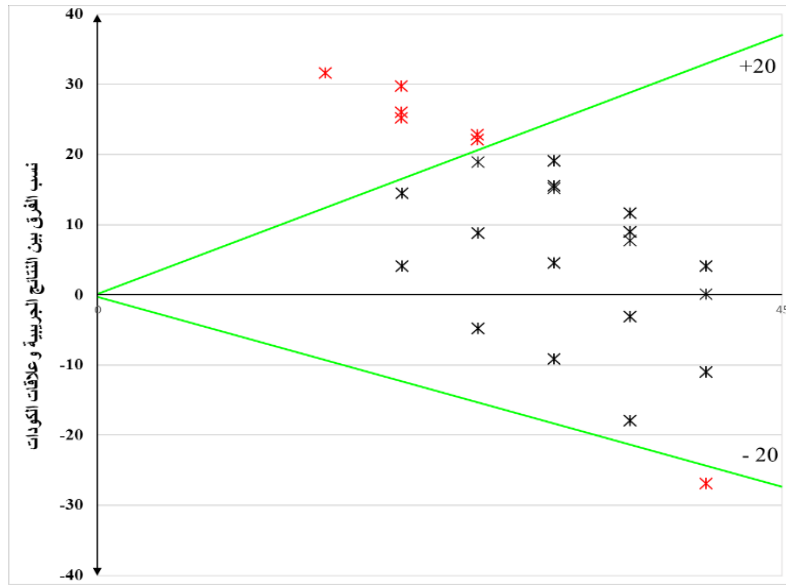
الجدول رقم (8): نسب الفرق في عزم الفتل الأعظمي T_u بين النتائج التجريبية ونتائج علاقات الكودات

نسبة الفرق في عزم الفتل الأعظمي T_u (%)						اسم الكود المجموعة
التجريبي $T_{u exp}$	الأسترالي AS3600	الأوروبي EURO	الصيني GB 50010	الأمريكي ACI-318	العربي السوري	
12.73	4.1	29.7	14.5	26.0	31.6	R0
11.59	-4.7	22.8	8.8	18.9	25.2	R25
11.06	-9.1	19.1	4.5	15.2	22.1	R50
10.13	-18.0	11.6	-3.1	7.7	15.6	R75
9.33	-26.9	4.1	-11.0	0.1	9.0	R100

نلاحظ مما سبق هناك فروقات بسيطة بين نسب الفرق وفق الكودات والنتائج التجريبية، وكانت النتائج التجريبية قريبة من النتائج النظرية التي يعطيها الكود الصيني GB 50010، والكود الأسترالي AS3600 وكانت معظم نسب الفرق تتراوح بين (4| -% |18| %) للمجموعات (R75-R50-R25-R0).

نلاحظ من الجدول (8) أن هناك اختلاف بقيم عزوم الفتل الأعظمية وفق الكودات السابقة وكان هناك تقارب بين القيم التي يعطيها الكود العربي السوري والكود الأمريكي ACI-318.

ونلاحظ أن نسب الفرق (%) بين النتائج التجريبية والنتائج التي تعطيها علاقات الكودات تتراوح ضمن المجال $[-20, +20]$ وذلك وفقاً للمجموعات (R100-R75-R50-R25-R0) وكانت معظم هذه المجموعات ضمن المجال المقبول ما عدا بعض الحالات تقع خارج المجال المقبول كما موضح في الشكل (11).



الشكل رقم (11): نسب الفرق بين النتائج التجريبية والكودات ضمن وخارج المجال $[-20, +20]$

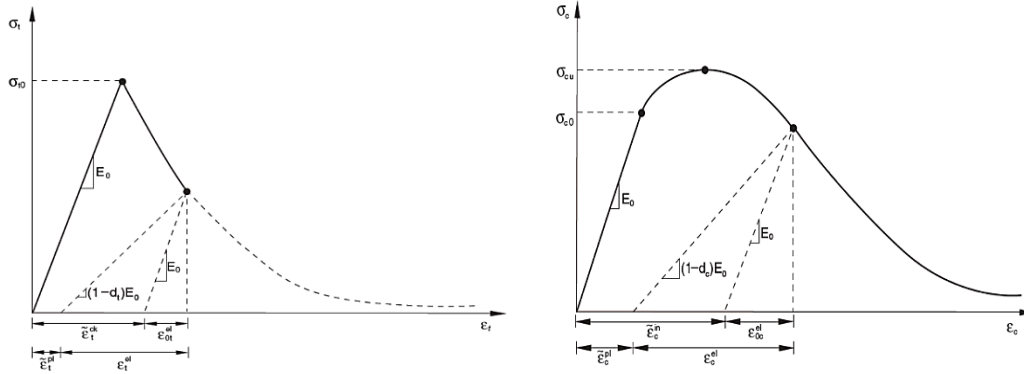
6- الدراسة التحليلية:

تم إجراء التحليل العددي باستخدام برنامج (ABAQUS, V6.14-3) [1] الذي يعتمد على طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method, FEM)، تم استخدام مواصفات المواد والمخططات التجريبية المذكورة سابقاً من أجل المحاكاة حيث تم استخدام العنصر المكعبي (Solid Element C3D8R) وهو مؤلف من ثمان عقد وكل عقدة تحوي ثلاث درجات حرية لنمذجة الجائز الخرساني، والعنصر الشبكي T3D2 وهو مؤلف من عقدتين تحتوي كل منهما على ثلاث درجات حرية لنمذجة فولاذ التسليح، والأذرع الفولاذية تم نمذجتها من النوع (Discrete rigid)، يوضح الجدول (9) قيم المعاملات المدخلة للبرنامج وهذه القيم معتمدة في نموذج CDP ضمن برنامج (ABAQUS, V6.14-3)، ويوضح الشكل (12) سلوك الخرسانة على الضغط وعلى الشد.

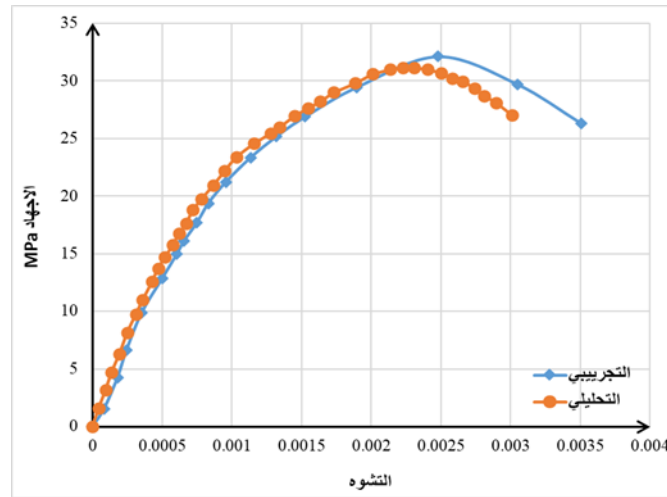
تم المقارنة بين مخطط (إجهاد- تشوه) التجريبي والتحليلي للمجموعة (r0) كما موضح في الشكل (13).

الجدول رقم (9): قيم المعاملات المدخلة في برنامج (ABAQUS, V6.14-3)

معامل بواسون (μ)	معامل المرونة للخرسانة (EC)	معامل اللزوجة (Viscosity) (parameter)	سطح التلدن (k)	نسبة الضغط الثنائي إلى الأحادي f_{bo}/f_{co}	لامركزية التدفق الكامن (Eccentricity) (Flow potential)	قيمة زاوية الاحتكاك الداخلية للخرسانة (Dilation angle)
0.174	25664.91	0.0005	0.667	1.16	0.1	36

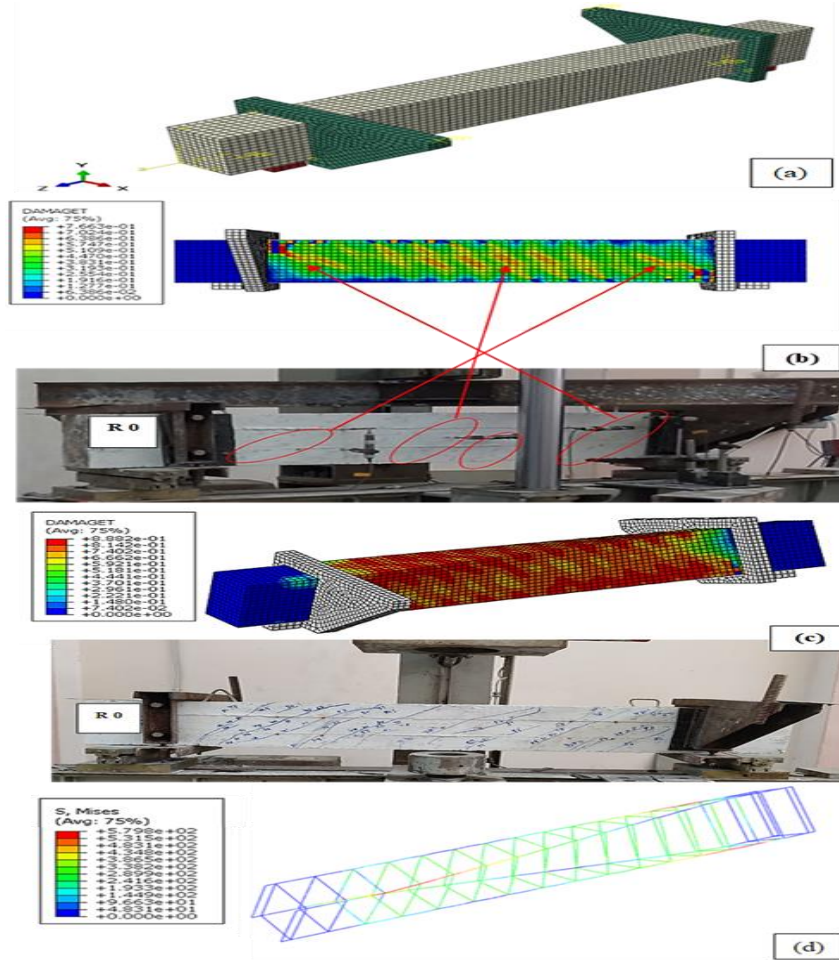


الشكل (14): سلوك الخرسانة في حالة الضغط والشد المحوري



الشكل (15): مقارنة مخطط (إجهاد - تشوه) بين التحليلي والتجريبي

ويوضح الشكل كما يوضح الشكل (16) النموذج التحليلي ضمن برنامج (ABAQUS, V6.14-3)، وتوزع وشكل الشقوق في النموذج التجريبي والتحليلي في مرحلة بداية ظهور الشقوق وفي مرحلة الانهيار، واجهادات (Von Mises) ما بعد الانهيار في فولاذ التسليح.



الشكل رقم (16): شكل وتوزع الشقوق في النموذج التجريبي والتحليلي

(a): النموذج التحليلي في برنامج ABAQUS (b): مرحلة بداية ظهور الشقوق

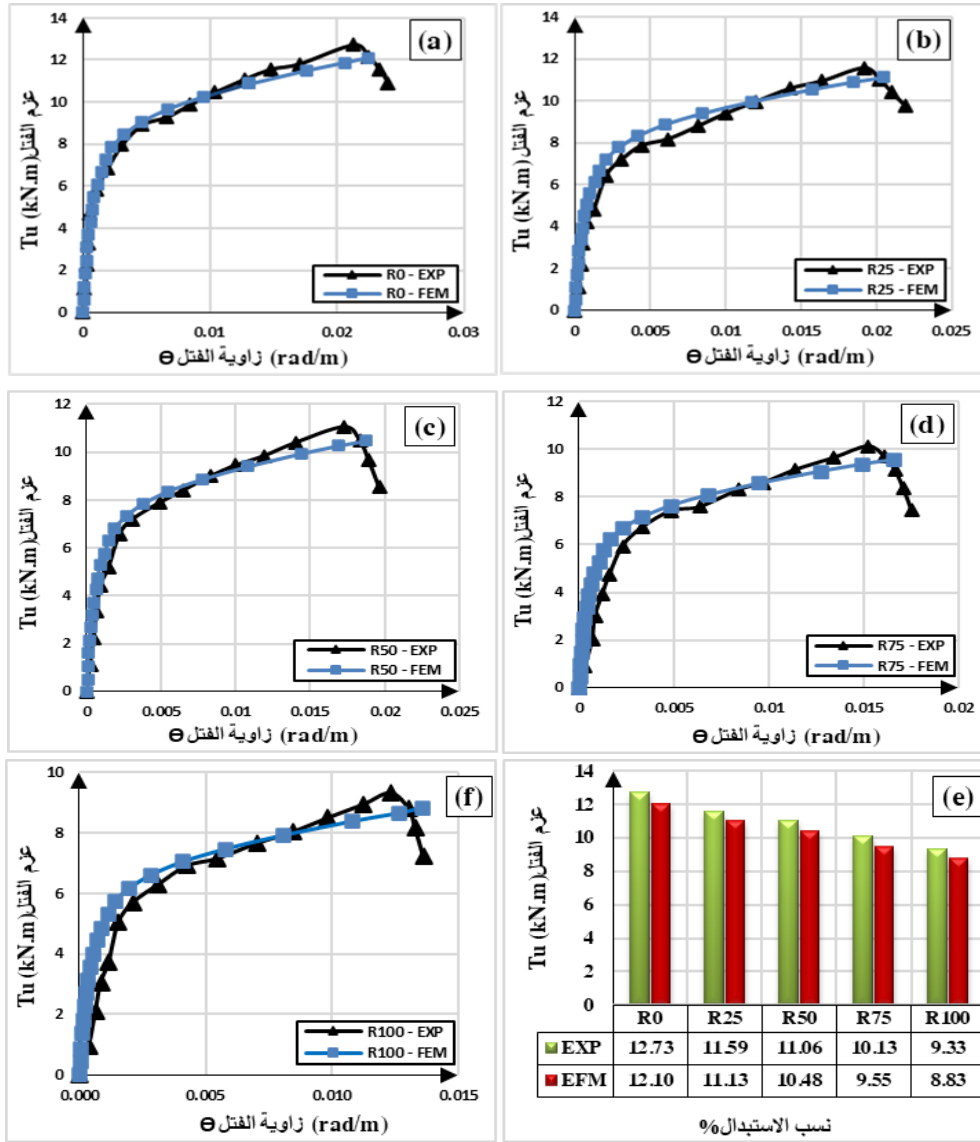
(c): مرحلة الانهيار (d): الاجهادات في فولاذ التسليح

يوضح الجدول (12) المقارنة بين النتائج التجريبية (EXP)، والتحليلية (FEM) لكل المجموعات (R100-R75-R50- R25-R0).

الجدول رقم(12): المقارنة بين النتائج التجريبية (EXP)، والتحليلية (FEM)

نسبة الفرق بـ %		النتائج التحليلية (FEM)		النتائج التجريبية (EXP)		المجموعة
زاوية الفتل θ_u (%)	عزم الفتل T_u (%)	θ_u FEM (rad/m)	T_u FEM (kN.m)	θ_u EXP (rad/m)	T_u EXP (kN.m)	
5.3	5	0.0225	12.09	0.0213	12.73	R0
6.3	4	0.0205	11.13	0.0192	11.59	R25
8	5.2	0.0187	10.48	0.0173	11.06	R50
8.4	5.7	0.0166	9.55	0.0152	10.13	R75
11.6	5.4	0.01403	8.83	0.0124	9.33	R100

ويبين الشكل (17) مخطط عزم الفتل $T_{EXP,FEM}$ ، وزاوية الفتل $\theta_{EXP,FEM}$ للنماذج التجريبية والتحليلية لكل المجموعات (R100-R75-R50-R25-R0) والمقارنة بينهما.



الشكل رقم (17): مخطط عزم الفتل T_u ، وزاوية الفتل θ_u للنماذج التجريبية والتحليلية [13]

(a): المجموعة الأولى R0 (b): المجموعة الثانية R25 (c): المجموعة الثالثة R50

(d): المجموعة الرابعة R75 (e): المجموعة الخامسة R100 (f): عزم الفتل الأعظمي التجريبي والتحليلي

7- الخلاصة والنتائج:

- 1- إن الوزن النوعي للركام المعاد تدويره أقل من الوزن النوعي للركام الطبيعي، وكذلك الوزن الحجمي ينخفض كلما زاد نسبة الركام المعاد تدويره وكان هذا الانخفاض يتراوح بين (0.9%-2.6%) مقارنة الركام الطبيعي.
- 2- أعطت الخرسانة المكونة من الركام المعاد تدويره مقاومة على الضغط بعمر 7، 28، 120 يوم أقل من مقاومة الخرسانة المكونة من الركام الطبيعي، وكانت نسب الانخفاض بعمر 120 يوماً (3.8%-7.6%-13.33%-18.41%) للمجموعات (R100-R75-R50-R25) بالترتيب على التوالي مقارنةً مع المجموعة (R0).

- 3- انخفض معامل المرونة E_c مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره للمجموعات (R100-R75-R50-R25) بالترتيب بنسبة (10.3%، 14.1%، 20.98%، 26.95%)، وانخفضت مقاومة الشد بالفلق بنسبة (15.4%-16.1%-21.8% -25.8%) مقارنةً مع المجموعة (R0) المكونة من الركام الطبيعي.
- 4- ان الجوائز المحضرة من الركام المعاد تدويره والمعرضة للقتل أعطت نفس السلوك للجوائز المكونة من الركام الطبيعي، ويرافقه انخفاض بقيمة عزم القتل الأعظمي بنسبة (8.9%-13.1%-20.4%-26.7%) للمجموعات (R50-R25-R100-R75) مقارنةً بالجوائز الخرسانية المسلحة المكونة من الركام الطبيعي (R0).
- 5- أعطت النتائج التحليلية توافق جيد مع النتائج التجريبية من حيث توزع وشكل الشقوق، وكانت نسبة الفرق في عزم القتل الأعظمي T_u بين التجريبي والتحليلي تتراوح بين (4%-5.7%)، وكانت نسبة الفرق بزواوية للقتل θ_u (5.3%-11.6%) لكل المجموعات (R100-R75-R50-R25-R0).

8- التوصيات:

- 1- اعتمد هذا البحث على استخدام نفايات المباني في دير بعلبة نوصي باستخدام نفايات خرسانية من غير مصدر او استخدام النفايات الخرسانية الناتجة من مخبر الخرسانة بكلية الهندسة المدنية في جامعة البعث.
- 2- نوصي بإجراء دراسة سلوك الجوائز الخرسانية المكونة من الركام المعاد تدويره والمعرضة للقتل مع إضافات أخرى مثل البوزولانا الطبيعية او غيرها.

المراجع

- [1] – ABAQUS, version 6.14–3. (2015). Dassault systems similia Gorp, USA.
- [2] –Abukersh S. (2009). “High Quality Recycled Aggregate Concrete”. PhD thesis, School of Engineering and the Built Environment, Edinburgh University, UK.
- [3] – Akbari YV., Arora NK., and Vakil MD. (2011). “Effect on recycled aggregate on concrete properties”. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 924–928.
- [4] – ACI 318–08 (1992). “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”. ACI Manual of Concrete Practice, Part 3, *American Concrete Institute, Detroit, MI*.
- [5] –Al Mahmoud F., Boissiere R., and Mercier C., Khelil A. (2020). “Shear behavior of reinforced concrete beams made from recycled coarse and fine aggregates”. *Structures; vol.25*, 660–669.
- [6] – Aqeel H., Mazin A. and Zahir M. N. (2022).” Verification of a Torsional Behaviour Prediction Model for Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams” *Hindawi Journal of Engineering Volume 2022, Article ID 3340489, 13 pages*.
- [7]– BS EN 1992–1 (2004), Eurocode2, "Design of Concrete Structures, Part 1–1: General rules and rules for buildings", European committee for standardization CEN.
- [8]– BS 8110, (1985) "Structural Use of Concrete, Part 1: Code of Practice for Design and Construction", *British Standards Institution (BSI), London*.

- [9]– C.S. Committee BD-002 (2001), AS 3600 – Concrete Structures, *Australian Standard (2001)*.
- [10]– Fonteboa G., Belen T., Martinez F., Lage I., and López J. (2009). “Structral shear behavior of recycled concrete with silica fume”. *Constr. Build Master*; vol.23(11), pp. 3406–3410.
- [11]– Fsthifazl G., Razaqpur G., Isgor B., Abbas A., and Fournier B. (2009). “Flexural performance of steel–reinforced recycled concrete beams”. *ACI Struct.*, vol. 106(6), pp. 58–67.
- [12]– GB 50010–2010, Code for design of concrete structures, in: Beijing, Gen. Adm. Qual. Supervision, Insp. Quar. People’s Repub. China Stand. Adm. *People’s Repub. China [in English] Administration Qual, 2015. Supervision, Insp.*
- [13] – Gonzalez B., and Martinez F. (2005). “Recycled aggregate concrete: aggregate and mix properties”. *Material of constructions, Spain; vol. 55, pp. 53–66.*
- [14]– Kikuchi M., Mukai T., and Koizumi H. (1988). “Properties of concrete products containing recycled aggregate”. *In: Proc., 2nd int. symp. on demolition and reuse of concrete and masonry; vol.2, pp. 595–604.*
- [15] – Kou SH. (2005). “Reuse recycled aggregate in structural concrete”. *PhD thesis, Polytechnic University, Hong Kong.*
- [16] – Maruyama I., Sogo M., Sogabe T., Sato R., and Kawai K. (2004). “Flexural properties of reinforced recycled concrete beams”. *International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Paper No. 315, Barcelona, Spain.*
- [17] – Origin Pro 2018, SR1, b9.5.1.195, copyright 1991–2017, origin lab corporation.
- [18] – Park S. (1999). “Recycled Concrete Construction Rubble as Aggregate for New Concrete”. *Building Research Association of New Zealand; vol.86, pp. 1–20.*
- [19] – Patane, A and Vesmawala, G; (2023) “Experimental and analytical investigation of the behaviour of reinforced concrete beam under pure torsion” *Materials Today: Proceedings, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat 395007, India.*
- [20] – Prakash M., Satyanarayanan KS., Parthasarathi N., Senthil SS., M. Vishal M., and Deepakraj V., (2023). “An experimental study on reinforced concrete beam with continuous spiral stirrups under pure torsion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol.27(2), pp. 781–793.*
- [21]– Tamador M., (2014). "Study of mechanical properties of Recycled Aggregate Concrete". Damascus university.

[22]–Xiao J., Xie H., and Yang Z. (2012). “Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete”. *Cem. Concr. Res.*; vol. 42, pp.700–709.

- [23] – "الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة" (2018)، الطبعة الخامسة، دمشق.
- [24] – الكود المصري (ECP 203-2017) "تصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية" – التحديث الثالث – 2017 – القاهرة.
- [25] – م. بشرى العكاري، د. سليمان العامودي (2021). "دراسة خواص البيتون المنفذ بركام معاد تدويره" (2021). مجلة جامعة البعث – المجلد 43 لعام 2021.
- [26] – م. فلاح مبارك، د. منيب العلاف، د. إحسان الطرشة (2023). "دراسة تجريبية لسلوك الجوائز الخرسانية المسلحة المعرضة للقتل باستخدام الركام المعاد تدويره كاستبدال جزئي من الركام الطبيعي". مجلة جامعة البعث – 2023.