

تأثير استخدام الركام المعاد تدويره في الأعمدة الخرسانية المسلحة المعرضة لقوة ضغط محورية

أنس حوري، محمد صفو

قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة حلب، سوريا

anas.hwary1993@gmail.com

Received: 08/03/2021

Accepted: 20/04/2021

المستخلص - برزت الحاجة في الوقت الحاضر الى إعادة استخدام نواتج الخرسانة المخربة ومخلفات البناء الناتجة عن عمليات الهدم أو الحروب والكوارث الطبيعية بسبب ازدياد كلفة تخزين هذه المخلفات وايضاً نفاذ مواد البناء الطبيعية مع الزمن ومنها على وجه الخصوص الركام الخشن (البصص). تم في هذا البحث إجراء دراسة تجريبية على /14/ عمود خرساني مسلح معرّض لقوة ضغط محورية، إن أبعاد العمود هي (250x250x1000) mm، إن متغيرات البحث هي نسبة التسليح الطولي (1.62%, 1%) ونسب استبدال الركام الطبيعي الخشن Natural Coarse Aggregate NA بالركام الخرساني الخشن المعاد تدويره Recycled Coarse Aggregate RA وفق التالي (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%). تم قياس قيمة الحمولة المحورية الأعظمية على الضغط تجريبياً ومقارنتها مع القيم الحسابية وفق بعض الكودات العالمية والكود العربي السوري وكما تم اختبار اثر تغيير نسب استبدال الركام المعاد تدويره على خصائص الخلطات الخرسانية (المقاومة المميزة على الضغط، مقاومة الشد بالفلق، مقاومة الشد بالانحناء البسيط)، أظهرت النتائج ان نسبة تشرب الماء من أجل الركام المعاد تدويره أعلى من الركام الطبيعي مما يتطلب إضافة كميات من الماء الى الخلطات الخرسانية للمحافظة على قابلية تشغيلها وهذا ينعكس سلباً على مقاومة الخرسانة الناتجة على الضغط، وتبين الدراسة ان مقدار النقصان في مقاومة الخرسانة على الضغط بلغ تقريباً بحدود 19.8% عند العمر 28 يوم عند نسبة الاستبدال 60% ويمكن اعتبارها قيمة مقبولة بحيث يمكن استعمال هذه الخلطات في الخرسانة المسلحة حسب الكود العربي السوري وازدادت المقاومة عند النسبة 10% بمقدار 9.32% وبلغ مقدار نقصان الحمولة المحورية الأعظمية تجريبياً من أجل نسب الاستبدال أصغر أو تساوي 40% حوالي 6% بينما بلغ النقصان 15.7% من أجل النسبة 60%.

الكلمات المفتاحية: الركام الخرساني معاد التدوير -الضغط المحوري -الأعمدة الخرسانية المسلحة-نسبة الاستبدال.

ABSTRACT- At present, the need for reusing destroyed concrete products and construction wastes WHICH resulted from demolitions or wars and natural disasters has emerged because of the increase in storing cost of these wastes and also the depletion of natural building materials over time, coarse aggregate (gravel) particularly. In this research, an experimental study was conducted on /14/ reinforced concrete columns exposed to a compressive axial force, column dimensions are (250 x 250 x 1000) mm, the parameters in this research are the reinforcement ratios (1%, 1.62%) and the replacing ratios of natural coarse aggregate NA by recycled concrete coarse aggregate RA as following (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%), The values of the maximum axial load on compression for columns were measured experimentally and compared with the mathematical values according to some international codes and the Syrian Arab Code. Also, The effect of changing replacing ratios of recycled aggregate was tested on the Characteristics of concrete mixtures (Compressive strength, Splitting Strength, Tensile Strength in bending), The results showed that the water absorption ratio of recycled aggregate is higher than natural aggregate, which requires adding extra amounts of water to concrete mixtures to conserve their workability and this leads to a reduction in the resulted concrete compressive strengths, and this study shows that concrete compressive strength decreasing value reached almost around 19.8% at age 28 days for replacing ratio 60% and this value can be acceptable to use these mixtures in reinforcement concrete according to Syria Arab Code, Also the concrete compressive strength increased by 9.32% at the replacing ratio 10%, the maximum axial load on compression decreased by 6% at replacing ratios smaller or equal to 40% while the decreasing reached about 15.7% for the replacing ratio 60%.

Key words: Recycled Concrete Aggregate – Axial Compression – Reinforced Concrete columns – Replacing Ratios.

1. مقدمة:

تعد الخرسانة المسلحة من أهم وأكثر المواد المستعملة في العالم بعد الماء لما لها من تأثير كبير على تطور الأمم، ويتزايد عدد الأبنية نتيجة الثورة الصناعية والنمو الاقتصادي أدى ذلك إلى ازدياد الطلب بشكل كبير على المواد الخام الطبيعية المكونة للخرسانة وخاصة الركام الخشن (الحصى) والتي بدورها تتناقص تدريجياً. تم تقدير كمية مخلفات البناء الناتجة عن الهدم في الولايات المتحدة الأمريكية لونها بحوالي 123 مليون طن سنوياً ويتم إنتاج حوالي 2 مليار طن من الركام الطبيعي ومن المتوقع بأنها بلغت عام 2020 بحدود 2.5 مليار طن^[1]. إن الحل المناسب للحفاظ على موارد الركام الطبيعي هو إعادة تدوير الخرسانة المخربة وإنتاج ركام خشن بديل لاستخدامه في الخرسانة الإنشائية والمسمى (Recycled Aggregate RA) عن طريق تكسير الخرسانة القديمة لقطع بحجم حبيبات الحصى وإزالة المواد الغريبة منها مثل فولاذ التسليح والورق والقطع البلاستيكية والجبس وغسلها وغربلتها وفصلها إلى أحجام مختلفة لتشكل مصدر رخيصاً لركام الخرسانة معادة التدوير، ورغم المحاسن التي يمتلكها الركام المعاد تدويره اقتصادياً وبيئياً إلا أنه يمتلك سلبيات كثيرة على صعيد مكوناته وخصائصه بمقارنته مع الركام الطبيعي منها:

1- عندما يتم تكسير مخلفات الخرسانة تبقى كمية من المونة الاسمنتية (الملاط) ملتصقة مع جزيئات الحصى في الركام المدور وهذا المونة الملتصقة ضعيفة وهي السبب الرئيسي في نقصان جودة الركام المعاد تدويره ويبين الشكل 1 التحام المونة الاسمنتية القديمة مع حبيبات الحصى.



الشكل 1 : التحام المونة الاسمنتية مع حبيبات الحصى^[2]

2- ازدياد نسبة تشربه للماء نتيجة التصاق المونة الاسمنتية مع سطحه لذلك إنتاج الركام الناعم غير موصى به بسبب نسبة تشربه العالية جداً^[1].

3- نقصان الكثافة الحجمية ونقصان الوزن النوعي^[1].

4- ازدياد نسبة التآكل وقابلية التكسر^[1].

5- ازدياد نسبة حبيبات الغبار العالقة على سطوح الحصى^[1].
6- إمكانية احتوائه على الشوائب العضوية أو المواد الكيميائية الضارة^[1].

2. أهمية البحث:

تتم أهمية البحث في التشجيع على إعادة تدوير الخرسانة القديمة لاستخراج الركام الخشن المعاد تدويره بسبب سهولة استخراجها وقلّة كلفتها بالمقارنة مع الركام الطبيعي ودوره الإيجابي في التخفيف من الآثار السلبية لمخلفات البناء والهدم على البيئة وإنتاج خرسانة جديدة ذات مقاومة مقبولة يمكن استخدامها في الخرسانة المسلحة وخاصة في الدول التي تعاني من الإزمات والحروب والكوارث الطبيعية التي ينتج فيها آلاف الأطنان من الخرسانة المخربة.

3. هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة سلوك الأعمدة الخرسانية المسلحة باستخدام الخرسانة ذات الركام المعاد تدويره RCA مع استبدال الركام الخشن الطبيعي NA بالركام الخشن المعاد تدويره RA الداخلة في خلطاتها وفق نسب معينة مع الأخذ بالحسبان تغيير نسبة التسليح الطولي وحيث سيتم اختبار الأعمدة على الضغط المحوري وإيجاد حمولة الانهيار تجريبياً ودراسة تغيرات بعض الخصائص الميكانيكية للخلطات الخرسانية المدروسة، ثم مقارنة النتائج التجريبية مع العلاقات الحسابية المعطاة وفق الكود الأمريكي^[3] والكود الياباني^[4] والكود العربي السوري^[8] للخرسانة التقليدية.

4. الدراسة المرجعية:

درس^[2] اختبار خصائص 4/ خلطات خرسانية تحوي على ركام خشن معاد تدويره وتم اختبار 17/ عمود مختلف من الخرسانة المسلحة باختلاف جودة وكمية الركام المعاد تدويره. وتمت مقارنة الأوزان النوعية ونسب التشرب للبحص المعاد تدويره مع المواصفات الصناعية القياسية الكورية KSF 2573 وفق الجدول رقم 1:

الجدول 1: مواصفات العينات المدروسة ومقارنتها مع المواصفات

الصناعية القياسية الكورية^[1]

| الوزن النوعي gr/cm ³ | | نسبة التشرب % | |
|---------------------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| المواصفات القياسية الكورية | العينات المدروسة | المواصفات القياسية الكورية | العينات المدروسة |
| 2.5 < | 2.59~2.26 | 5% > | (6.28~1.59)% |

على الأقل ومقاوماتها تتراوح بين (20 – 18) Mpa وظهرت النتائج ما يلي:

(1) إن تأثير إضافة الركام المعاد تدويره يعد مهملاً على سلوك الضغط للأعمدة عند مستويات اجهاد قليلة وتبدأ بالظهور عند ازدياد الحمولة المطبقة الى 35% من القيمة العظمى بغض النظر عن نسبة التسليح.

(2) يتحمل التسليح الطولي الأثر الأكبر من الضغط المطبق بشكل خاص عند العينات ذات نسب الاستبدال 30% وتحمل الأثر الأصغر من اجل العينات ذات نسب الاستبدال 50%.

(3) كانت نتائج الانهيار مقبولة ومتوقعة مع الأخذ بالحسبان بأن الخرسانة المطوقة ستتشظى للخارج بما يسمى الفعل القوسي ويتشكل عند الاسطح الخارجية المطوقة اقواس بشكل قطوع مكافئة بعد التشظي بميول مساوي الى 45°.

(4) تنقص المقاومة بزيادة نسبة الركام المعاد تدويره ويعود النقص الى ضعف التماسك بين المونة الاسمنتية الجديدة والمونة القديمة الملصقة على سطوح الركام المعاد تدويره ويمكن التغلب على هذا النقص باستخدام نسب ملائمة من العناصر الرئيسية للخرسانة او إضافة فولاذ تسليح ملائم.

قام^[6] بدراسة أثر إضافة صنفين من الركام المعاد تدويره على خلطتين من الخرسانة حيث كان الصنف A ناتجاً من ركام خرساني فقط بعد إزالة المواد الغريبة ومخلفات مواد البناء خلال عملية معالجته ونتج الصنف B من الركام الخرساني مختلطاً مع المواد الغريبة الناتجة عن مخلفات البناء وكان الصنف A أفضل من الصنف B من ناحية الخواص (نسبة التشرب وعامل التآكل) وكانت نسب الاستبدال للركام الخرساني المستخدم % (100 – 50 – 30 – 0) وتم اجراء تجربة الضغط على 480/ عينة مكعبية وقياس مقاومة الضغط بكسر 5/ عينات عند كل عمر من الاعمار 1-3-7-28/ يوماً وتم استنتاج ما يلي:

(1) وجد ان مقاومات العينات تزيد وتنقص حسب نسب الاستبدال وبلغ اعلى ارتفاع للمقاومة ذات الصنف A 9.3% عن المقاومة المطلوبة 50 Mpa عند نسبة الاستبدال 30% في العينات ذات الركام الطبيعي بينما نقصت 5.5% عن المقاومة 60 Mpa عند نسبة الاستبدال 100%.

في حين كانت نسبة تشرب الحصىات الطبيعية هي % (0.57~0.69) وبالتالي فإن ارتفاع نسب تشرب الركام المعاد تدويره تعود الى وجود المونة الملصقة عليه.

تم استخدام الركام الخشن المعاد تدويره بنسب استبدال % (0 – 30 – 60 – 100) وتبلغ نسبة الاستبدال الاعظمية المسموحة 30% حسب KS F 2573 واستخدمت باقي النسب من اجل دراسة أثر زيادة الركام المعاد تدويره على العنصر المدروس. إن مقاطع العينات هي 40 x 40 cm وارتفاعها 180 cm – 200 cm ونسبة التسليح الطولية 1.4% والاساور $\Phi 10/20$ cm حسب الكود الأميركي ACI 318- 08 وتم تكثيف الاساور في نهايتي الاعمدة وتطويقها باستخدام صفائح معدنية خارجية لمنع الانهيار المبكر في نهايات الاعمدة وتم استنتاج ما يلي:

(1) كلما زادت نسبة الاستبدال كلما نقصت مقاومة الضغط وأيضاً لاحظ زيادة المقاومة في بعض العينات ذات الركام المعاد تدويره عن العينات ذات الركام الطبيعي واستنتج بأنه لا يوجد نتائج مترابطة بين نسبة الاستبدال والمقاومة وذلك يعود الى إمكانية تشكل روابط قوية بين الحواف الحادة لحبيبات الركام المعاد تدويره والبقايا الاسمنتية مع المونة الجديدة.

(2) نقصان قوة التحمل الاعظمية في بعض العينات ذات الركام المعاد تدويره عن العينات ذات الركام الطبيعي بنسبة (%6-8%) من اجل نسبي الاستبدال (%60, 100%) وتساوت القوتان تقريباً في باقي النسب.

(3) كانت قوة التحمل الاعظمية لكل العينات أكبر من القوة الاسمية المحسوبة حسب الكود ACI 318- 08.

(4) تشابهت أنماط التشققات في جميع العينات عدا تلك التي خضعت الى لامركزية طارئة.

(5) تم اقتراح استخدام الركام المعاد تدويره بنسبة لا تزيد عن 30% من اجل الحصول على خرسانة التي لا تقل مقاومتها عن 21 Mpa ولا تزيد عن 27 Mpa.

قام^[5] باختبار سلوك 12/ عمود تحت تأثير الضغط المحوري مع تغيير نسب التسليح ونسب استبدال الركام المعاد تدويره وفق التالي (%0, 30%, 50%, 100%) مع استعمال تطويق الاعمدة عند النهايات باستخدام الالياف الكربونية وتم الحصول على الركام الخشن المعاد تدويره من 5/ عينات من الخرسانة عمرها 20 سنة

للأسمنت (50% - 55%) ولوحظ عدم إمكانية استعمال الخلطة من أجل نسبة الاستبدال 100% عند نسبة الماء للأسمنت 50% بسبب انخفاض قابلية تشغيلها بشكل كبير وتم استنتاج ما يلي:

- (1) انخفضت مقاومة العينات ذات نسبة الاستبدال 100% بنسبة 35% عن العينات ذات نسبة الاستبدال 0% بينما انخفضت المقاومة في العينات ذات نسبة الاستبدال 50% بنسبة 15%.
- (2) تم التوصية باستخدام نسب معينة للركام المعاد تدويره حسب المقاومة المطلوبة للخلطة الجديدة والحاجة الى استخدامها (مباني سكنية، منشآت صناعية...) وظهرت النتائج ان استخدام نسبة استبدال 50% من الركام المعاد تدويره في الخلطات الخرسانية RCA تعطي مقاومات مقبولة للمنشآت العادية مقارنة بالخلطات ذات الركام الطبيعي NCA.

1.4. حساب قوة التحمل الحدية على الضغط وفق بعض الكودات العالمية والكود العربي السوري:

يتم إدخال أثر كل من الخرسانة وفولاذ التسليح في حساب القوة التحمل القصوى على الضغط وأعطت الكودات العالمية [3][4] بالإضافة للكود العربي السوري [8] علاقات لحسابها وفق الجدول رقم 2.

5. خصائص المواد المستخدمة في تحضير الخلطات المدروسة:
1.5. المواد الحصوية الخشنة الطبيعية (البحص) NA : إن الحصويات الطبيعية هي من النوع الكلسي ذات قطر أعظمي >25mm.

2.5. المواد الحصوية الخشنة المعاد تدويرها (البحص) RA : إن الحصويات المعاد تدويرها المستعملة هي ناتجة عن تكسير وتحطيم خرسانة متهدمة من منطقة جمعية الزهراء بمدينة حلب (سورية) وتمت إزالة المواد الغريبة منها وغربلتها بحيث أصبحت ذات قطر أعظمي >25mm] ويبين الشكل 2 البحص الطبيعي والبحص المعاد تدويره.



أ. البحص المعاد تدويره RA ب. البحص الطبيعي NA

الشكل 2: البحص الطبيعي NA والبحص المعاد تدويره RA

(2) نقصت مقاومة جميع العينات ذات الصنف B عن المقاومتين المطلوبتين (40 – 50) Mpa لكل نسب الاستبدال وكان الانخفاض الأكبر 21.2% عند النسبة 100% وكانت الزيادة الكبرى 19.4% من أجل المقاومة 60 Mpa عند نسبة الاستبدال 50%.

قام [1] بإجراء التجارب على ثلاثة أنواع من الخرسانة مع تماثل الشروط في خصائص الخلطات:

(المحتوى الاسمنتي، ماس الحبات الأعظمي 32 mm، قابلية التشغيل، التدرج الحبي للركام، نوع وكمية الركام الناعم) وكانت نسب الاستبدال للركام الخرساني % (0 – 50 – 100).

تمت مقارنة خصائص الركام الطبيعي والمعاد تدويره مع المواصفات القياسية السورية SRPS B.B2.010:1986 وكانت جميع خصائص الركام الطبيعي محققة بينما كان عامل لوس انجولس للركام المعاد تدويره أكبر من المطلوب وذلك بسبب ضعف الترابط بين المونة الملتصقة و أجزاء الحصى وكانت النتائج كالتالي:

(1) تم الحصول على نفس قابلية التشغيل للخلطات الثلاث واحتاجت الخلطة من أجل نسبة الاستبدال 50% الى كمية إضافية من الماء بنسبة 10% عن الخلطة ذات الركام الطبيعي 0% ونسبة 20% من أجل نسبة الاستبدال 100% كما لوحظ نقصان الكثافة الحجمية للخرسانة في الخلطات ذات الركام المعاد تدويره عن الخلطات ذات الركام الطبيعي بنسبة 3% وازدادت مقاومة العينات ذات الركام المعاد تدويره عند نسبتي الاستبدال (50%-100%) عند العمر 28 يوم بنسبة 5% عن العينات ذات الركام الطبيعي.

(2) كان تطور المقاومة مع الزمن للخلطات الثلاث متماثلاً تقريباً. قام [7] بدراسة تأثير استخدام الحصويات المعاد تدويرها من الخرسانة المتصلبة محلياً وإنتاج خرسانة جديدة وقارنت نتائج تجارب المواد المحلية مع نتائج محلية وعالمية واستخدمت نفس شروط تصميم الخلطات في المرجع [1] وبنفس نسب الاستبدال مع مراعاة الأمور التالية:

كافة التجارب تمت في مختبر جامعة دمشق أي ان جميع المواد المكونة لخلطات الخرسانة محلية المنشأ وتم استخدام المواد الناعمة الطبيعية بسبب الامتصاص العالي جداً للحصويات الناعمة المدورة وتم استخدام نسب الاستبدال % (0 – 50 – 100) ونسبة الماء

- 3.5. المواد الحصوية الناعمة (الزرادة): تم استخدام زرادة من النوع الكلسي ذات قطر اعظمي $[>12.5mm]$.
 وبين الجدول رقم 3 مواصفات المواد المستعملة في الخلطات. ونلاحظ ان متطلبات الجودة للبحص الخشن المدور من اجل عامل لوس انجلوس غير كافية حسب المواصفات القياسية السورية بسبب ضعف الترابط بين حبيبات الحصى والمونة الاسمنتية المحيطة بها
- 4.5. الرمل (النحاة): الرمل المستخدم من النوع الكلسي ذات قطر اعظمي $[>4.75mm]$

الجدول 2: حساب قوة التحمل الحديدية على الضغط وفق الكودات المختلفة

| الكود | قوة التحمل القصوى على الضغط |
|--|---|
| الكود الأمريكي ACI 318-08 [3] | $P_0 = \Omega [0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$ حيث: f'_c : المقاومة الأسطوانية للبيتون على الضغط (Mpa). f_y : إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح الطولي (Mpa). A_g : مساحة المقطع البيتوني الخامي (mm^2). A_{st} : مساحة فولاذ التسليح الطولاني (mm^2). Ω : معامل تخفيض المقاومة ويؤخذ 0.8 من اجل الضغط البسيط. |
| الكود الياباني Japanese Codes-2007 [4] | $P_{Theo} = (0.85f'_c A'_c + f_y A_{st}) / Y_b$ f'_c : المقاومة الأسطوانية للبيتون على الضغط (Mpa). f_y : إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح الطولي (Mpa). A_c : مساحة المقطع البيتوني (mm^2). A_{st} : مساحة فولاذ التسليح الطولاني (mm^2). Y_b : معامل العنصر ويؤخذ بشكل عام 1.3 |
| الكود العربي السوري [8] | $N_u = \Omega [0.85f'_c A'_c + f_y A'_s]$ حيث: f'_c : المقاومة الأسطوانية للبيتون على الضغط (Mpa). f_y : إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح الطولي (Mpa). A'_c : مساحة المقطع البيتوني الخامي (mm^2). A'_s : مساحة فولاذ التسليح الطولي (mm^2). Ω : معامل تخفيض المقاومة ويؤخذ 0.65 من اجل الضغط البسيط. |

الجدول 3: مواصفات المواد المستعملة في تحضير الخلطات

| المواصفات القياسية السورية ^[5] | النحاة | الزرادة | البحص الخشن المعاد تدويره | البحص الخشن الطبيعي | الكثافة الظاهرية gr/cm^3 |
|---|--------|---------|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| - | 1.718 | 1.3 | 1.14 | 1.274 | الكثافة الجافة المرصوفة gr/cm^3 |
| - | 1.837 | 1.541 | 1.29 | 1.481 | عامل لوس انجلوس % LA |
| $30 \geq$ | - | - | 44.1 | 27.9 | الوزن النوعي |
| - | - | - | 2.76 | 2.8 | نسبة التشرب % |
| - | - | - | 8.42 | 1.98 | المكافئ الرملي % |
| - | 71 | - | - | - | |

الجدول 4: مواصفات فولاذ التسليح المستخدم

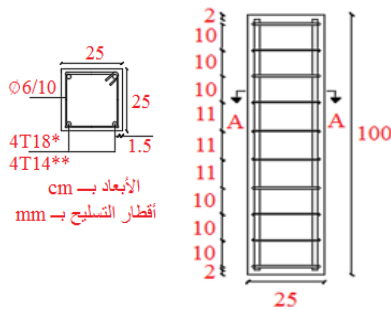
| القطر (mm) | إجهاد الخضوع f_y (MPa) | إجهاد الانقطاع f_u (MPa) | التطاول النسبي ϵ % |
|------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 18 | 481 | 607 | 25 |
| 14 | 571 | 730 | 15 |
| 6 | 284 | 439 | 45 |

6. كميات المواد المستخدمة في تحضير (1 m³) من الخرسانة ذات الركام المعاد تدويره (RCA):

يبين الجدول 5 كميات المواد المستخدمة في تحضير (1 m³) من خلطات الخرسانة المدروسة ويبين الجدول 6 نتائج تجربة هبوط المخروط والوزن الحجمي ونسبة الماء للأسمنت للخلطات الخرسانية المدروسة.

7. البرنامج التجريبي:

تم صب /14/ عمود خرساني مسلح على مجموعتين بأبعاد (25x25x100) cm مع تغيير بنسب استبدال البحص الخشن الطبيعي بالبحص الخشن المعاد تدويره للمجموعتين وفق التالي (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%) التسليح الطولي في المجموعة الاولى (1.62%) وقضبان التسليح الطولي 4T18 بينما كانت نسبة التسليح الطولي في المجموعة الثانية (1%) وقضبان التسليح الطولي 4T14 والتسليح العرضي Ø6/10 cm للمجموعتين وتم صب مع كل عمود ثلاث عينات أسطوانية (Ø15/30cm) لاختبارها على الشد بالفلق وتسع عينات مكعبية بأبعاد (15x15x15) cm لاختبارها على الضغط وثلاث عينات موشورية بأبعاد (7x7x28) cm لاختبارها على الشد بالإنحناء البسيط وتم حفظ جميع العينات بنفس الجو المحيط ودرجات الحرارة وأجريت التجارب السابقة في "مخبر البيتون والإنشاءات" في كلية الهندسة المدنية بجامعة حلب بينما تم اختبار عينات الأعمدة الخرسانية المسلحة في "مخبر تجريب المواد"، حيث تم تطبيق الحمولة بشكل متزايد تدريجياً باستخدام جهاز تحميل هيدروليكي تصل قدرته الأعظمية الى (500 ton) حتى الوصول للانهايار وإيجاد قوة التحمل الأعظمية تجريبياً P_{exp}. ويبين الشكل 3 الأبعاد الهندسية وتفاصيل التسليح الطولي والعرضي للأعمدة المستخدمة في التجارب.



ونسبة تشرب الحصى المعاد تدويرها أكبر بكثير من تشرب الحصى الطبيعية ويعود ذلك الى وجود المونة الاسمنتية الملتصقة على حبيبات الحصى مما يجعل نسبة تشربها مرتفعة.

5.5. الأسمنت: تم استخدام الإسمنت البورتلاندي العادي (ماركة الجمل) والذي تبلغ مقاومته المكعبية على الضغط بعد (28) يوم 42.5N/mm².

6.5. الماء: تم استخدام ماء الشرب العادي في خلط مكونات الخرسانة.

7.5. فولاذ التسليح: تم إجراء اختبار الشد لعينات من فولاذ التسليح المستخدم فكانت النتائج كما في الجدول 4 التالي:

الجدول 5: كميات المواد المستخدمة في تحضير (1 m³) من

خلطات الخرسانة المدروسة RCA

| البحص الخشن المدور | البحص الخشن الطبيعي | الزراة | الرمل (النحاة) | الاسمنت | نسبة الاستبدال |
|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Kg/m ³ | Kg/m ³ | Kg/m ³ | Kg/m ³ | Kg/m ³ | % |
| 0 | 480 | 470 | 540 | 400 | 0% |
| 48 | 432 | 470 | 540 | 400 | 10% |
| 96 | 384 | 470 | 540 | 400 | 20% |
| 144 | 336 | 470 | 540 | 400 | 30% |
| 192 | 288 | 470 | 540 | 400 | 40% |
| 240 | 240 | 470 | 540 | 400 | 50% |
| 288 | 192 | 470 | 540 | 400 | 60% |

الجدول 6: نتائج تجربة هبوط المخروط والوزن الحجمي ونسبة الماء

للأسمنت للخرسانة المصنعة RCA

| الوزن الحجمي للخرسانة | الهبوط w/c | المجموعة | الوزن الحجمي للخرسانة | الهبوط w/c | المجموعة | نسبة الاستبدال |
|-----------------------|------------|----------|-----------------------|------------|----------|----------------|
| Kg/m ³ | cm | % | Kg/m ³ | cm | % | % |
| 2252 | 12 | 60 | 2252 | 12.5 | 60 | 0% |
| 2262 | 13 | 60 | 2242 | 13 | 60 | 10% |
| 2262 | 8.5 | 60 | 2252 | 8 | 62 | 20% |
| 2242 | 11 | 65 | 2242 | 12 | 64 | 30% |
| 2272 | 16.5 | 67 | 2262 | 14.5 | 64 | 40% |
| 2242 | 15.5 | 67 | 2252 | 15 | 65 | 50% |
| 2252 | 12.5 | 65 | 2252 | 12 | 65 | 60% |

* المجموعة الاولى من العينات التي نسبة تسليحها (1.62%).

** المجموعة الثانية من العينات التي نسبة تسليحها (1%).

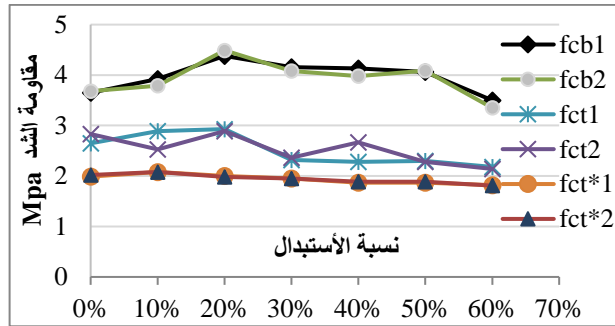
(28) يوماً ومقارنتها مع مقاومة الشد المميزة المحتملة وفق الكود العربي السوري^[8] f_{ct}^* التي تحسب وفق العلاقة التالية:

$$f_{ct}^* = 0.44\sqrt{f_c'}$$

الجدول 8: مقاومات الشد بالانحناء البسيط f_{cb} ، الشد بالفلق f_{ct} ، الشد المميزة المحتملة f_{ct}^* للعينات المدروسة

| المجموعة | العمود | f_{cb} Mpa | f_{ct} Mpa | f_{ct}^* Mpa | $f_{cb}/f'c_{(28)}$ % | $f_{ct}/f'c_{(28)}$ % |
|----------|--------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | C0 | 3.65 | 2.65 | 1.99 | 17.91 | 13.0 |
| | C10 | 3.92 | 2.89 | 2.08 | 17.59 | 13.0 |
| | C20 | 4.38 | 2.93 | 2.00 | 21.87 | 14.6 |
| | C30 | 4.16 | 2.32 | 1.95 | 21.15 | 11.8 |
| | C40 | 4.13 | 2.28 | 1.87 | 22.78 | 12.6 |
| | C50 | 4.06 | 2.30 | 1.87 | 22.54 | 12.8 |
| | C60 | 3.5 | 2.18 | 1.82 | 20.37 | 12.7 |
| 2 | C0 | 3.68 | 2.83 | 2.02 | 17.56 | 13.50 |
| | C10 | 3.79 | 2.53 | 2.08 | 16.94 | 11.28 |
| | C20 | 4.49 | 2.89 | 1.98 | 22.14 | 14.27 |
| | C30 | 4.08 | 2.36 | 1.95 | 20.73 | 12.01 |
| | C40 | 3.98 | 2.67 | 1.89 | 21.54 | 14.43 |
| | C50 | 4.09 | 2.28 | 1.89 | 22.14 | 12.34 |
| | C60 | 3.35 | 2.14 | 1.81 | 19.93 | 12.71 |

ويبين الشكل 5 المقارنة بين مقاومة الشد بالانحناء البسيط f_{cb} ومقاومة الشد بالفلق f_{ct} ومقاومة الشد المميزة المحتملة f_{ct}^* للعينات الخرسانية المدروسة مع تغيير بنسب الاستبدال للمجموعتين.



الشكل 5: المقارنة بين مقاومات الشد بالانحناء البسيط f_{cb} ، الشد بالفلق f_{ct} ، الشد المميزة المحتملة f_{ct}^*

ويبين الشكل 6 اختبار عينة العمود الخرساني المسلح باستخدام جهاز التحميل الهيدروليكي والشكل المتشوه بعد الانتهاء

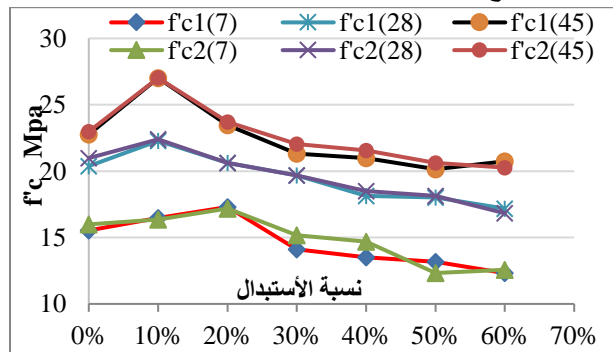
الشكل 3: تفاصيل التسليح الطولي والعرضي للأعمدة المستخدمة في التجارب، * (المجموعة 1 تسليحها 4T18)، ** (المجموعة 2 تسليحها 4T14).

ويبين الجدول رقم 7 نتائج المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط f_c' للعينات الخرسانية المدروسة عند الأعمار المختلفة (7-28-45) يوم.

الجدول 7: المقاومة الاسطوانية المميزة على الضغط عند الأعمار المختلفة (7-28-45) يوم

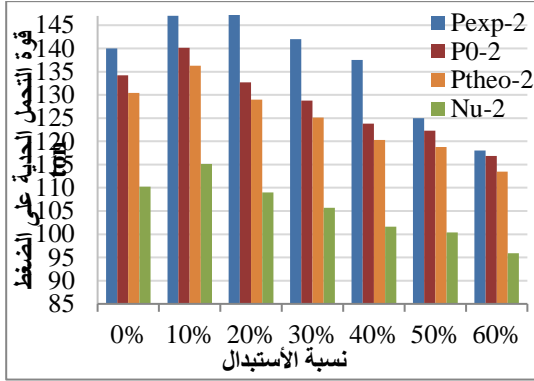
| المجموعة | العمود | $f_c'(7)$ Mpa | $f_c'(28)$ Mpa | $\Delta(28)\%$ * | $f_c'(45)$ Mpa |
|----------|--------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 1 | C0 | 15.53 | 20.38 | 0 | 22.76 |
| | C10 | 16.47 | 22.28 | 9.32 | 27.02 |
| | C20 | 17.3 | 20.62 | 1.18 | 23.47 |
| | C30 | 14.1 | 19.67 | -3.48 | 21.33 |
| | C40 | 13.51 | 18.13 | -11.04 | 20.98 |
| | C50 | 13.16 | 18.01 | -11.63 | 20.15 |
| | C60 | 12.32 | 17.18 | -15.7 | 20.74 |
| 2 | C0 | 16.00 | 20.98 | 0 | 22.99 |
| | C10 | 16.36 | 22.40 | 6.78 | 27.02 |
| | C20 | 17.19 | 20.62 | -1.69 | 23.70 |
| | C30 | 15.17 | 19.67 | -6.21 | 22.04 |
| | C40 | 14.70 | 18.49 | -11.86 | 21.57 |
| | C50 | 12.33 | 18.13 | -13.56 | 20.62 |
| | C60 | 12.56 | 16.83 | -19.77 | 20.27 |

* الفارق النسبي مع الأخذ بالحسبان أن العينة المرجعية هي C0
ويبين الشكل 4 المقاومة الاسطوانية على الضغط لمختلف نسب الاستبدال مع الأعمار المختلفة.



الشكل 4: المقاومة الاسطوانية على الضغط لمختلف نسب الاستبدال مع الأعمار المختلفة

ويبين الجدول رقم 8 نتائج مقاومة الشد بالانحناء البسيط f_{cb} ومقاومة الشد بالفلق f_{ct} للعينات الخرسانية المدروسة عند العمر



ب. المجموعة الثانية

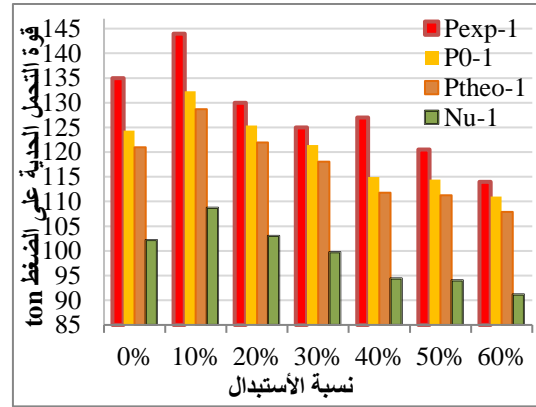
الشكل 7 مقارنة بين قوى التحمل الحديدية التجريبية والحسابية وفق بعض الكودات

ويبين الجدول رقم 8 نتائج قوة التحمل الحديدية على الضغط لعينات الاعمدة الخرسانية المسلحة وفق مختلف نسب الاستبدال تجريبياً ومقارنتها مع قوة التحمل الحديدية على الضغط المحسوبة وفق بعض الكودات العالمية [3][4] والكود العربي السوري [8]. ونجد ان قوة التحمل الحديدية للأعمدة على الضغط وفق الكود الأميركي تعطي قيم قريبة من القيم التجريبية بالمقارنة مع باقي الكودات.

يبين الشكل 7 مقارنة بين قوة التحمل الحديدية تجريبياً وقوة التحمل الحديدية الحسابية وفق الكودات المختلفة



الشكل 6: اختبار عينة العمود على الضغط حتى الانهيار والشكل المتشوه



أ. المجموعة الأولى

لجدول 8: نتائج قوة التحمل الحديدية على الضغط لعينات الأعمدة ومقارنتها مع القيم المحسوبة وفق الكودات المختلفة

| المجموعة | العمود | P _{exp} ton | P ₀ ton الكود الأمريكي [3] | P _{Theo} ton الكود الياباني [4] | Nu ton الكود العربي السوري [8] | $\frac{P_{exp}}{P_0}$ | $\frac{P_{exp}}{P_{Theo}}$ | $\frac{P_{exp}}{N_u}$ |
|----------|--------|----------------------|--|---|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1 | C0 | 135 | 124.37 | 120.95 | 102.20 | 1.09 | 1.12 | 1.32 |
| | C10 | 144 | 132.32 | 128.71 | 108.76 | 1.09 | 1.12 | 1.32 |
| | C20 | 130 | 125.38 | 121.93 | 103.03 | 1.04 | 1.07 | 1.26 |
| | C30 | 125 | 121.40 | 118.04 | 99.75 | 1.03 | 1.06 | 1.25 |
| | C40 | 127 | 114.97 | 111.75 | 94.43 | 1.10 | 1.14 | 1.34 |
| | C50 | 120.5 | 114.46 | 111.26 | 94.01 | 1.05 | 1.08 | 1.28 |
| | C60 | 114 | 110.99 | 107.87 | 91.15 | 1.03 | 1.06 | 1.25 |
| 2 | C0 | 140 | 134.20 | 130.43 | 110.22 | 1.04 | 1.07 | 1.27 |
| | C10 | 147 | 140.15 | 136.25 | 115.13 | 1.05 | 1.08 | 1.28 |
| | C20 | 150 | 132.71 | 128.98 | 108.99 | 1.13 | 1.16 | 1.38 |
| | C30 | 142 | 128.75 | 125.11 | 105.72 | 1.10 | 1.14 | 1.34 |
| | C40 | 137.5 | 123.79 | 120.26 | 101.62 | 1.11 | 1.14 | 1.35 |
| | C50 | 125 | 122.31 | 118.81 | 100.40 | 1.02 | 1.05 | 1.25 |
| | C60 | 118 | 116.86 | 113.48 | 95.89 | 1.01 | 1.04 | 1.23 |

8. الإستنتاجات:

(28) يوماً وأبدت جميع العينات تقريباً مقاومة على الشد بالانحناء البسيط قيم أكبر من العينة المرجعية ذات نسبة الاستبدال 0% ونستنتج بأن استخدام البحص المعاد تدويره يزيد من قدرة الخرسانة على تحمل الشد بالانعطاف. تراوحت نسبة مقاومة الشد بالفلق بين % (11.28~14.6) من المقاومة المميزة على الضغط للعينات المدروسة عند العمر (28) يوماً وأبدت العينات ذات نسب الاستبدال (10%, 20%) في المجموعة الأولى مقاومة أكبر مقارنةً مع العينة المرجعية 0% بينما أعطت العينات في المجموعة الثانية مقاومة أكبر عند النسب (20%, 40%) وانخفضت تلك المقاومات عن العينات المرجعية من أجل باقي النسب ونستنتج بأنه لا يوجد علاقة ترابط بين مقاومة الشد بالفلق مع استخدام البحص المعاد تدويره. أعطت جميع العينات مقاومات على الشد بالانحناء البسيط والشد بالفلق أكبر من المقاومات المميزة المحتملة على الشد المحسوبة وفق الكود العربي السوري^[8]. إن قيم القوى الحدية على الضغط المحسوبة وفق الكود الأمريكي أعطت قيم قريبة من القيم التجريبية بالمقارنة مع قيم باقي الكودات ونلاحظ تقارب النتائج الحسابية بشكل أكبر مع القيم التجريبية باستخدام فولاذ تسليح عالي المقاومة ونوصي بالتعديل على العلاقة الحسابية في الكود العربي السوري^[8] (تعديل عامل تخفيض المقاومة Ω) حتى تعطي قيم أقرب للقيم التجريبية. نوصي بالقيام بعدد أكبر من التجارب لإيجاد علاقة حسابية تربط بين أثر تغيير نسب الاستبدال على المقاومة. تشابهت أنماط التشوه تقريباً لكل عينات الأعمدة حيث تبدأ التشققات بالظهور في الخرسانة عند تطبيق 70% تقريباً من القوة التحمل الحدية وذلك في الأجزاء القريبة من المساند بزاوية 45° وازدادت هذه التشققات بالتوسع والانتشار حتى تنتشظى الخرسانة للخارج والوصول للانتهيار.

الخلاصة:

يقدم البحث دراسة تجريبية لسلوك الأعمدة الخرسانية المسلحة المعرضة لضغط محوري بإدخال أثر استبدال الركام الخشن الطبيعي بالركام الخشن المعاد تدويره في خلطات الخرسانة وفق نسب مفروضة وقياس قيم التحمل الأعظمية تجريبياً ومقارنتها مع القيم المحسوبة وفق الكودات العالمية، حيث يتضمن البرنامج العملي اختبار سبعة أعمدة خرسانية مسلحة بنسبة تسليح 1.62% وسبعة أعمدة خرسانية مسلحة بنسبة تسليح 1% وكانت نسب الاستبدال في المجموعتين (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60) وتبين النتائج بأن

نقصان قوة التحمل الحدية التجريبية للأعمدة في المجموعة الأولى مع زيادة نسبة استبدال البحص الخشن الطبيعي بالبحص الخشن المعاد تدويره وقد بلغت نسبة النقصان من أجل نسب الاستبدال (20%, 30%, 40%) اقل من 6% بينما تقاربت القيم التجريبية في المجموعة الثانية مع العينة المرجعية وبلغ مقدار النقصان قيمة وسطية وصلت الى 15.7% من أجل نسبة الاستبدال 60% في المجموعتين ويعود ذلك النقصان إلى وجود المونة الإسمنتية القديمة الملتصقة على سطح الركام مما يؤدي إلى ضعف المقاومة وزيادة كمية الماء اللازمة للخلطات والتي بدورها تؤدي إلى انخفاض تحمل الأعمدة. نلاحظ أنه باستخدام فولاذ تسليح عالي المقاومة كما في المجموعة الثانية فإن تأثير استخدام البحص المعاد تدويره يعد مهماً على قوة التحمل الحدية للأعمدة تجريبياً من أجل نسب الاستبدال اقل أو تساوي 40% وأعطت النتائج قيم متقاربة جداً بسبب زيادة تحمل فولاذ التسليح للقوة المطبقة نظراً لارتفاع حد المرونة فيه.

ازدياد المقاومة الاسطوانية على الضغط للعينات المدروسة بنسبة بلغت 9.32% من أجل نسبة الاستبدال 10% في المجموعة الأولى بينما وصلت الى 6.78% في المجموعة الثانية ويعود ذلك الى ارتفاع نسبة تشرب البحص المعاد تدويره للماء مما يؤدي الى نقصان في كمية ماء الخلط. تساوت الأوزان الحجمية للخرسانة تقريباً من أجل جميع نسب الاستبدال مع الخرسانة العادية ذات نسبة الاستبدال 0%. بلغ أكبر زيادة لقوة التحمل الحدية للأعمدة تجريبياً من أجل نسبة الاستبدال 10% بنسبة 6.67% عن العينة المرجعية في المجموعة الأولى وبنسبة 7.14% عند نسبة الاستبدال 20% في المجموعة الثانية ويعود ذلك الى إمكانية تشكل روابط قوية بين السطوح الحادة وحبيبات البحص المعاد تدويره والمونة الاسمنتية المحيطة. بلغ أكبر نقصان للمقاومة الاسطوانية على الضغط من أجل نسب الاستبدال (30%, 40%, 50%, 60%) بنسبة وصلت تقريباً الى حدود 19.8%

ويعود ذلك الى ارتفاع نسبة تشرب البحص المعاد تدويره للماء والحاجة لزيادة نسبة الماء للإسمنت للمحافظة على قابلية تشغيل الخلطات ويمكن استعمال تلك الخلطات بحذر في الخرسانة المسلحة حسب الكود العربي السوري^[8].

تراوحت نسبة مقاومة الشد بالانحناء البسيط بين (17.56~22.78) % من المقاومة المميزة على الضغط للعينات المدروسة عند العمر

- [5] Hastemoglu H., (2015), "Effect of Recycled Aggregate on the Compressive Behaviour of Short Concrete Columns", *J Civil Environ Eng- Volume 5. Issue 6.* 1000194, ISSN: 2165-784X JCEE.
- [6] Lee Y., Kim S., Lee S., Baek S., Cho Y. And Hong S., (2013) "A Comparative Study of Compressive Strength of High Strength Concrete by Replacement Ratio of Recycled Coarse Aggregate", *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, Vol. 680.* 222-225.
- [7] اللحام ليلي، 2017- تقنية إعادة استخدام الخرسانة الناتجة عن هدم الأبنية. الجامعة الافتراضية السورية، سورية، 24 صفحة.
- [8] الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة، (2012) - الطبعة الرابعة، نقابة المهندسين، سورية، 404 صفحة.

قوة التحمل الحدية للأعمدة والمقاومة الاسطوانية للخرسانة تتقصان مع زيادة نسبة الاستبدال وتقاربت القيم التجريبية للأعمدة مع الحسابية منها وفق الكود الأمريكي.

المراجع:

- [1] Malešev M., Radonjanin V. And Marinković S., (2010), "Recycled concrete as aggregate for structural concrete production". *Sustainability 2.5*,1204-1225.
- [2] Choi W. And Yun H., 2012- Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading. *Engineering structures*,41, 285-293.
- [3] American Concrete Institute (2014), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14)", USA.
- [4] Japan Society of Civil Engineers (2007), *Standard Specifications for Concrete Structures- Design.*