مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (36) العدد (4) 2014
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (36) No. (4) 2014

دراسة تجريبية على الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره

الدكتور قاسم الزحيلي*
تماضر مقبل**

(تاريخ الإيداع 21 / 5 / 2014. قُبِل للنشر في 4/ 8 / 2014)

□ ملخّص □

تعتبر الخرسانة من أكثر مواد البناء استخداماً للمميزات الكثيرة التي تتمتع بها، الأمر الذي يؤدي بالنتيجة إلى كميات كبيرة من النفايات الخرسانية الناتجة عن الهدم كمحاولة لإنتاج خرسانة صديقة للبيئة، تم في هذا البحث استخدام النسب 0%، 50%، 75%، 100% من الركام الخشن المعاد تدويره كبديل عن الركام الخشن الطبيعي في الخلطة الخرسانية، وتمت دراسة قابلية التشغيل وكذلك الوزن الحجمي للخرسانة في الحالة الرطبة والجافة، كما تمت دراسة سلوك الخرسانة المنتجة من الركام المعاد تدويره من خلال تعيين مقاومة الضغط عند 7، 28، 56 يوم، وكذلك مقاومة الشد بالفلق ومعامل المرونة في اليوم 28. بيّن هذا البحث أن استخدام الركام المعاد تدويره يؤدي إلى انخفاض الخصائص الميكانيكية للخلطة الخرسانية عندما تزداد نسبة الركام المعاد تدويره عن 50% حيث من أجل نسبة 100% من الركام المعاد تدويره انخفضت مقاومات الضغط، الشد بالفلق ومعامل المرونة بمقدار 14%، 22%، 25% على الترتيب بالمقارنة مع الخرسانة التقليدية بركام طبيعي وبالتالي من الممكن استخدام الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره في الحصول على العناصر الانشائية غير الحاملة.

الكلمات المفتاحية: الركام المعاد تدويره، دراسة تجريبية، قابلية التشغيل، الخصائص الميكانيكية.

*أستاذ مساعد – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق – سورية.
**طالبة دراسات عليا (دكتوراه)– قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق – سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (36) العدد (4) 2014
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (36) No. (4) 2014

Experimental Study on The Recycled Aggregate Concrete

Dr. Kassem alzouhayli*
Tamador Mokbel**

(Received 21 / 5 / 2014. Accepted 4 / 8 / 2014)

□ ABSTRACT □

Concrete considers as the most popular building material because of the many advantages that it has. This come up with a huge amount of concrete waste. As a way to produce a concrete which is friend to environment, four percentages 0%, 50%, 75%, 100% of coarse recycled aggregate as replacement of natural coarse aggregate in concrete mix are used in this research. The workability and wet and dry density are presented in this study. The compressive strength at age of 7, 28, 56 days are estimated, also splitting tensile strength and modulus of elasticity are founded at 28 day. The study shows that when The percentage of recycled aggregate exceeds 50% in concrete mix the mechanical properties reduce. When 100% of recycled aggregate is used the compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus decrease by 14%, 22%, 25% respectively, so it is possible to use recycled aggregate concrete in production of non-structural elements.

Key Words: Recycled Aggregate – Experimental Study- Workability – Mechanical Properties.

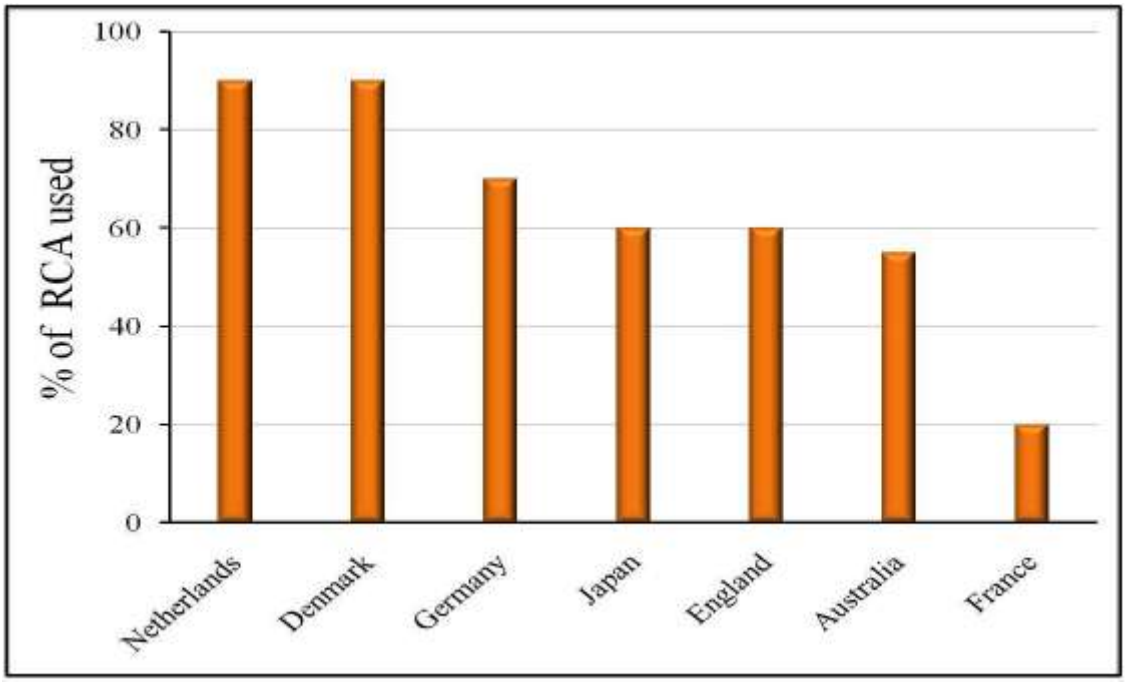
*Associate Professor in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.
**Ph.D. Student, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

مقدمة:

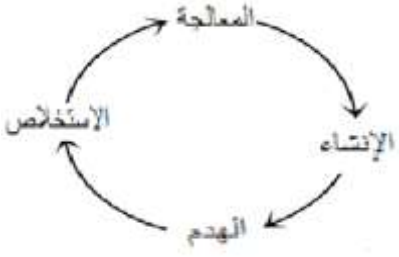
تعتبر الخرسانة من أهم مواد البناء لما لها من ميزات إيجابية ولا سيما كونها مادة بناء رخيصة ومحلية، وفي نهاية العقد الأخير من القرن العشرين تزايدت حركة هدم وإعادة إعمار المباني بغرض ملائمة أغراض جديدة أو بسبب انتهاء العمر التصميمي للمباني مما أدى إلى تراكم كميات كبيرة من المخلفات التي تشكل الخرسانة جزءاً كبيراً منها، فأصبح ذلك تحدياً جديداً للبيئة والمجتمع.

ازداد الوعي البيئي عالمياً في الآونة الأخيرة وأصبح إعادة استخدام أو تدوير مخلفات الهدم والبناء أحد أهداف التنمية المستدامة التي لها أثر إيجابي كبير على الجوانب البيئية والاقتصادية والاجتماعية.

أصبحت عملية إعادة التدوير سياسة تعتمدها وتصر عليها كثير من الدول المتقدمة وتعتبر نيوزيلاندا والدانمارك رائدة فيها كما يظهر في الشكل (1)، وتتلخص هذه العملية بتجميع نفايات الهدم والبناء ومعالجتها وإعادة استخدامها من جديد، أي إعادتها إلى دورتها الحياتية وجعلها مادة صالحة للاستعمال لنفس الغرض أو لأغراض أخرى الشكل (2). وهذه الطريقة مفيدة بيئياً كونها تقلل حجم النفايات المتولدة وبالتالي توفر مساحة الأرض المستغلة كمكب للنفايات، كما أنها تساهم في الحفاظ على المصادر الطبيعية الأصلية.



الشكل (1): كمية النفايات الخرسانية التي يتم تدويرها في بعض دول العالم (Pual, 2011) [1]



الشكل (2): دورة حياة مواد الإنشاء

قامت دراسات عدة بالبحث في خواص الركام المعاد تدويره (Recycled Aggregate, RA) وخصائص الخرسانة المنتجة منه (Recycled Aggregate Concrete, RAC)، وقد توصل كثير من الباحثين (Murali et al., 2012 [2]; Maslesve et al., 2010 [3]) إلى أن الركام المعاد تدويره RA يختلف عن الركام الطبيعي (Natural Aggregate, NA) بنواحٍ عدة أهمها أن الكثافة أقل، امتصاص أكبر للماء وفاقد الاهتراء أعلى وذلك بسبب المونة الاسمنتية القديمة التي تبقى ملتصقة على سطح RA، كما أوضح (Jankovic et al., 2011 [4]; Tam et al., 2005 [5]) أن الاختلاف في الشكل والحجم والملمس بين الركام الطبيعي والركام المعاد تدويره يؤثر على المنطقة الانتقالية الرابطة بين الركام والعجينة الاسمنتية وبالتالي يؤثر على المقاومة.

حاول (Montgomery, 1998 [6]) علاج الركام المعاد تدويره وذلك بطحنه في مطحنة دوّاره لإزالة العجينة الإسمنتية القديمة من على سطحه، ووجد أن الركام الأكثر نظافة يعطي خرسانة بجودة أعلى. إضافة إلى ذلك أوضح (Maslesve et al., 2010 [3]) في دراستهم أن جودة الركام المعاد تدويره ومصدره عامل هام جداً ويؤثر بشكل كبير على جودة الخرسانة المنتجة منه حيث تم اعتماد نفايات المخبر في دراستهم والتجارب التي أجروها.

عمل كثير من الباحثين (Murali et al., 2012 [2]; Tam et al., 2007 [7]) على تحسين الركام المعاد تدويره بمحاولة إزالة العجينة الإسمنتية الملتصقة على سطحه من خلال نقعه بمحاليل كيميائية، حيث قام (Murali et al., 2012 [2]) بنقع الركام المعاد تدويره بالماء، أو بمحاليل الأحماض كحمض الكبريت 24 ساعة ومن ثم تجفيفه واستعماله في صب العينات، وبيّنت النتائج أن مقاومة الضغط عند استخدام الركام المعالج زادت عن مقاومة الضغط للركام المعاد تدويره غير المعالج بنسب تتراوح بين 4.93% حتى 11.88%.

أوضح (Poon et al., 2004 [8]) أن قوام الخرسانة المنتجة من الركام المعاد تدويره تتأثر برطوبة الركام المعاد تدويره، فعند استخدام ركام مجفف في الفرن لاحظ زيادة في هبوط المخروط بسبب ارتفاع كمية المياه التي استخدمت لتعويض الامتصاص العالي للركام المعاد تدويره.

أما فيما يخص الخصائص الميكانيكية لهذا النوع من الخرسانة فقد توصل الكثير من الباحثين (Katz et al., 2003 [9]; Rahal, 2004 [10]; Xiao et al., 2005 [11]) إلى أن مقاومة الضغط ومعامل المرونة للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره أقل بالمقارنة مع قيمهما في الخرسانة التقليدية (Natural Aggregate Concrete, NAC)، وخاصة عندما تكون نسبة الاستبدال للركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره 100%. أما عند نسب استبدال منخفضة لا تتجاوز 30% فقد تبيّن أنها لا تؤثر بشكل كبير على الخواص الميكانيكية للخرسانة (Oikonomon, 2005 [12]).

أجريت دراسات متعددة حول أثر نسبة الركام المعاد تدويره كما في دراسة (Akbari et al., 2011 [13]) التي تم فيها اعتماد تدوير نفايات المخبر وأخذ نسب الاستبدال التالية (0%، 15%، 30%، 50%) للركام المعاد تدويره كبديل عن الركام الطبيعي، أظهرت النتائج أن المقاومة على الضغط تقل كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره، وتم تسجيل انخفاض في المقاومات من أجل نسبة استبدال 50% قدرت بـ (25%، 23%، 26%) في المقاومة على الضغط، الانعطاف والشد بالفلق على التتالي.

قام (Paul, 2011 [1]) بدراسة الخصائص الميكانيكية لـ RAC كمقاومة الضغط، معامل المرونة، التقلص والزحف. كما درس ديمومتها وذلك من أجل نسبة (0، 30، 100)% من RA، بيّنت الدراسة إمكانية الحصول على خرسانة منتجة من ركام معاد تدويره بمواصفات الخرسانة التقليدية تقريباً عندما يتم استخدام نسبة 30% من RA.

توصّل أيضا (Etxeberria et al., 2007 [14]) أنه من أجل نسبة استبدال كاملة للركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره تكون مقاومة الضغط أخفض بـ 20–25% عن حالة الخرسانة التقليدية، في حين أن معامل المرونة يكون أقل بحوالي 16%. تم التأكيد في هذا البحث أن استخدام نسبة 25% من RA بدلاً عن NA لا يؤدي إلى تغير يذكر على الخصائص الميكانيكية، وكوسيلة لتحسين أداء RAC أوضحت الدراسة أنه عند اعتماد نسبة استبدال تتراوح بين 50–100% فيجب أن تزاد كمية الاسمنت بنسبة 4–10% وتخفض نسبة w/c بمقدار 5–10%. توصل الباحث أيضاً من خلال بحثه أن مقاومة الشد لا تتأثر كثيراً عند استخدام RA في الخلطة الخرسانية.

أكّد في هذا الصدد أيضاً (Konin and Kouaido, 2011 [15]; Park, 1999 [16]) أن زيادة الاسمنت لها أثر جيد على تحسين مقاومة الضغط للخرسانة في حال استخدام الركام المعاد تدويره، حيث بيّن (Konin and Kouaido, 2011 [15]) أن استخدام كمية للاسمنت أعلى من 300 كغ/م^3 تحسّن مقاومة الضغط للخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره لتصبح شبيهة بالخرسانة المنتجة من ركام طبيعي.

يعتبر الامتصاص العالي للماء للركام المعاد تدويره من أهم الأسباب التي تعطي جودة منخفضة للخرسانة، لذلك قام (Rahal, 2007 [10]) بدراسة تجريبية على الخواص الميكانيكية لـ RAC واستخدام الركام المعاد تدويره وهو في الحالة المشبعة جافة السطح وذلك من أجل التخلص من مشكلة الامتصاص العالي له، أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط لـ RAC عند استخدم 100% من الركام المعاد تدويره حققت ما يقارب 90% من مقاومة الضغط لـ NAC، وفيما يخص تطور المقاومة والديمومة كانت النتائج متقاربة بين كلا الخرسانتين.

أهمية البحث وأهدافه :

تعتبر الخرسانة في سوريا من مواد البناء الأكثر استخداماً، وبالتالي فإنَّ هدم المباني القائمة في ظل الظروف الراهنة نتج عنه كم هائل من النفايات الخرسانية التي يجب العمل على الاستفادة منها، حتى يتحقق النفع البيئي والاقتصادي والاجتماعي معاً. ويتم ذلك من خلال إجراء أبحاث علمية تبين مدى إمكانية الاستفادة من هذه النفايات، وبالتالي يتوفر بيانات ومعطيات قد تشجّع الحكومة مستقبلاً على تقديم التسهيلات والتجهيزات اللازمة لاستخدام الركام المعاد تدويره واستغلال النفايات الخرسانية بالشكل المفيد والصحيح.

يهدف هذا البحث إلى دراسة كفاءة الخرسانة المنتجة من الركام الخشن المعاد تدويره عند استخدامه كبديل جزئي أو كلي عن الركام الخشن الطبيعي، من خلال تقييم بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لها كالضغط، الشد بالفلق ومعامل المرونة.

طرائق البحث ومواده:

- المواد الرابطة (Cementitious material): تم استخدام الصنف الأول من الإسمنت البورتلاندي العادي المنتج محلياً في معمل اسمنت عدرا. تم إيراد الخواص الكيميائية في الجدول (1) والخواص الفيزيائية للاسمنت في الجداول (2).
- الركام (Aggregate): تم استخدام الركام الطبيعي عادي الوزن وركام ناتج من إعادة تدوير الخرسانة كركام خشن في الخلطة الخرسانية. وفي هذه الدراسة تم اعتماد نفايات مخبر كلية الهندسة المدنية كمصدر للركام المعاد تدويره وهي عبارة عن مكعبات خرسانية في معظمها تم طحنها باعتماد كسارة في ريف دمشق، وكان المقاس الاعتباري

الأكبر للركام الطبيعي والمعاد تدويره يساوي 25 ملم، ومخططات التحليل الحبي للركام الطبيعي والمعاد تدويره مطابقًان للشروط والموصفات وموضحان في الشكلين (3 و 4) على التتالي. الخواص الميكانيكية للركام الخشن الطبيعي والمعاد تدويره مبينة في الجدول (3). بالنسبة للركام الناعم فقد تم استخدام ركام ناعم طبيعي نظيف في جميع الخلطات الخرسانية المستخدمة في هذه الدراسة.

- تم استخدام ملدن (Superplasticizer) في جميع الخلطات الخرسانية، الملدن المستخدم عالي الآداء، خافض للماء، موافق للمواصفة ASTM C-494-Type B، يدخل في تركيبه نفثالين فورمالدهيد (Naphthaline Formaldehyde) و لجنوسلفونيت (lignosulphonate) كثافته 1.2 كغ/م^3 خالي من الكلور (chloride free).
- الخلطات الخرسانية (Concrete mixes): يوضح الجدول (4) الكميات والترميز المعتمد في هذا البحث للخلطات الخرسانية الأربع التي تم تحضيرها في المخبر. تختلف الخلطات عن بعضها بنسبة الركام المعاد تدويره المستخدم، حيث تم استخدام النسب 0، 50، 75، 100٪ للركام الخشن المعاد تدويره بدلاً عن الركام الخشن الطبيعي. يدل الرمز R0 على أن الخلطة الخرسانية محضرة بدون ركام معاد تدويره، في حين الرمز R50 يدل على استخدام 50% ركام خشن معاد تدويره و50% ركام خشن طبيعي وهكذا. في جميع الخلطات تم استخدام نسبة الماء/الاسمنت تساوي 0,55، مع كمية اسمنت تساوي 350 كغ/م3. تم اعتماد طريقة الحجم المطلق لتصميم الخلطات وفق الطريقة الأمريكية (ACI 211.1-91, 2002 [17]) مع مقاومة أسطوانية مطلوبة تساوي 30 نيوتن/مم^2.

الجدول (1): الخصائص الكيميائية للاسمنت المستخدم

العنصر	النسبة المئوية
SiO_2	20
Al_2O_3	4.77
Fe_2O_3	4.57
CaO	60.11
MgO	3.64
SO_3	1.96

الجدول (2): الخصائص الفيزيائية للاسمنت المستخدم

المقاومة على الضغط للمونة الاسمنتية	اليوم	المقاومة نيوتن/سم٢
	2	15.78
	7	32.26
	14	34.95
	28	43.8
زمن الأخذ لاسمنت	بدايته (دقيقة)	137
	نهايته (ساعة)	3:02
الوزن النوعي	3.1	
الوزن الحجمي (غ/ليتر)	1150	
اختبار درجة النعومة حسب بلين (سم٢/غ)	3107	

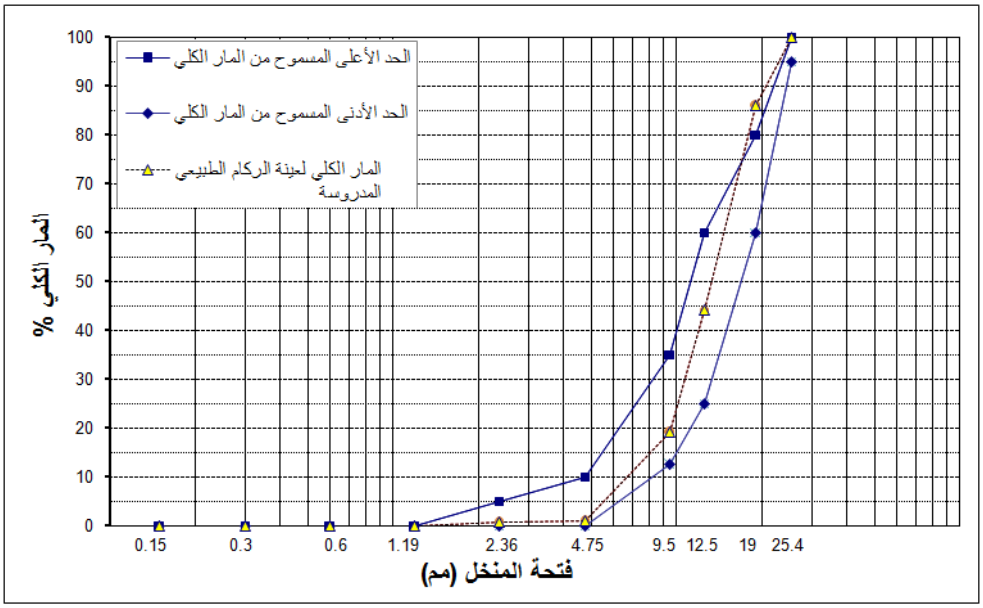
الجدول (3): الخصائص الفيزيائية للركام الطبيعي والمعاد تدويره

نوع الركام	الركام الطبيعي	الركام المعاد تدويره
الوزن النوعي الجاف مشبع السطح (SSD)	2.67	2.51
الامتصاص	1.17%	5.15%
الوزن الحجمي الردمي كغ/م^3	1335	1270
الفاقد بالاهتراء	19%	32.4%

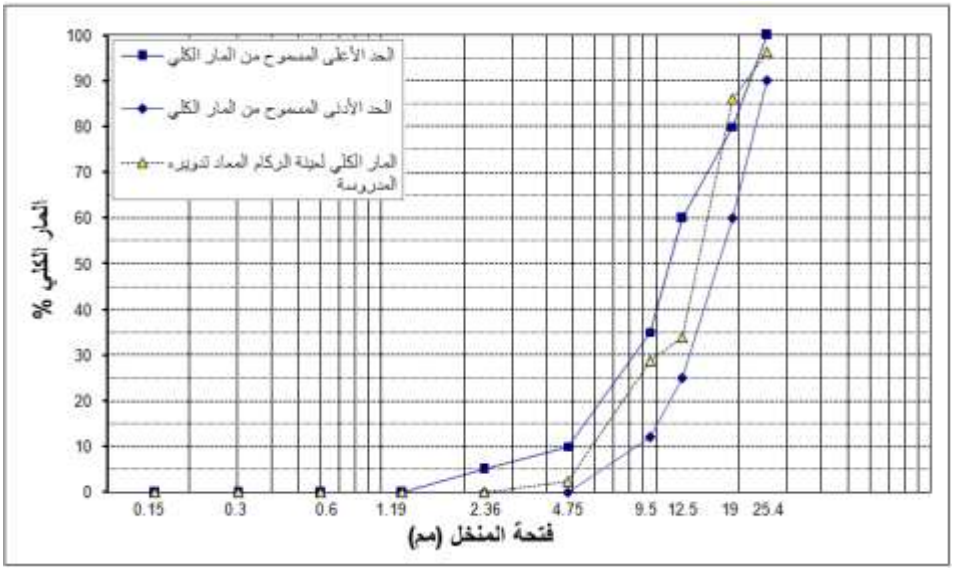
الجدول (4): مكونات وترميز خلطات البحث

رمز الخلطة	RA%		مكونات الخلطة كغ/م^3			
		الماء	الاسمنت	الرمل	البحص الطبيعي	البحص المعاد تدويره
R0	0	193	350	964	868	0
R50	50	193	350	959	436	410
R75	75	193	350	958	219	617.2
R100	100	193	350	957	0	826

- صب العينات ومعالجتها (Casting and curing): تم من أجل كل خلطة صب 9 مكعبات مقاس 150×150×150 مم لتحديد مقاومة الضغط، و3 أسطوانات مقاس 150x300 مم من أجل مقاومة الشد بالفلق، أيضا تم صب 3 مواشير 100×100×300 مم لإيجاد معامل المرونة. تم إجراء اختبار الضغط لتحديد مقاومة الضغط في الأيام 7، 28، 56، أما مقاومة الشد وعامل المرونة فقد تم تحديدهما في عمر 28 يوم لجميع خلطات البحث. تم صب جميع العينات في قوالب من الصلب ودكت، وتم فك القوالب بعد 24 ساعة، ثم تم وضعها في خزان ماء بدرجة حرارة المخبر $20 \pm 2°$.
- الاختبارات: أجريت جميع الاختبارات طبقًا للمواصفات الأمريكية (ASTM, 2004 [18]) في مخبر البيتون في كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق.



الشكل (3) مخطط التحليل الحبي للركام الطبيعي



الشكل (4) مخطط التحليل الحبي للركام المعاد تدويره

النتائج والمناقشة :

- الركام المعاد تدويره:

من الجدول (3) يتضح بأن الخصائص الفيزيائية للركام المعاد تدويره تختلف عن خصائص الركام الطبيعي، حيث يمكن ملاحظة أن الوزن النوعي والحجمي الردمي أقل في الركام المعاد تدويره عما هو عليه في الركام الطبيعي، حيث بلغ الوزن النوعي للركام المعاد تدويره (2.51) في حين أن الوزن النوعي للركام الطبيعي كان (2.67)، أيضا إن نسبة امتصاص الماء للركام المعاد تدويره (5.15%) أعلى بشكل واضح من نسبة امتصاص الماء للركام الطبيعي (1.17%). كما يلاحظ من الجدول (3) أن قيمة فاقد الاهتراء تأثرت بشكل كبير حيث كان فاقد الاهتراء وفقاً لاختبار لوس إنجلوس في حالة الركام الطبيعي (19%) أما في حالة الركام المعاد تدويره فقد كان (32.4%) . هذا التغير في الخصائص سببه المونة الإسمنتية القديمة التي بقيت ملتصقة على سطح الركام المعاد تدويره والذي تم الحصول عليه

من تكسير الخرسانة القديمة، فجعلت كثافته أقل، امتصاصه أعلى وفاقد اهترائه أكبر من الركام الطبيعي. إن هذه النتائج توافق النتائج في الدراسات السابقة حيث دراسة (Paul, 2011 [1]) تؤكد نفس النتائج.

- قابلية تشغيل الخرسانة (Slump loss):

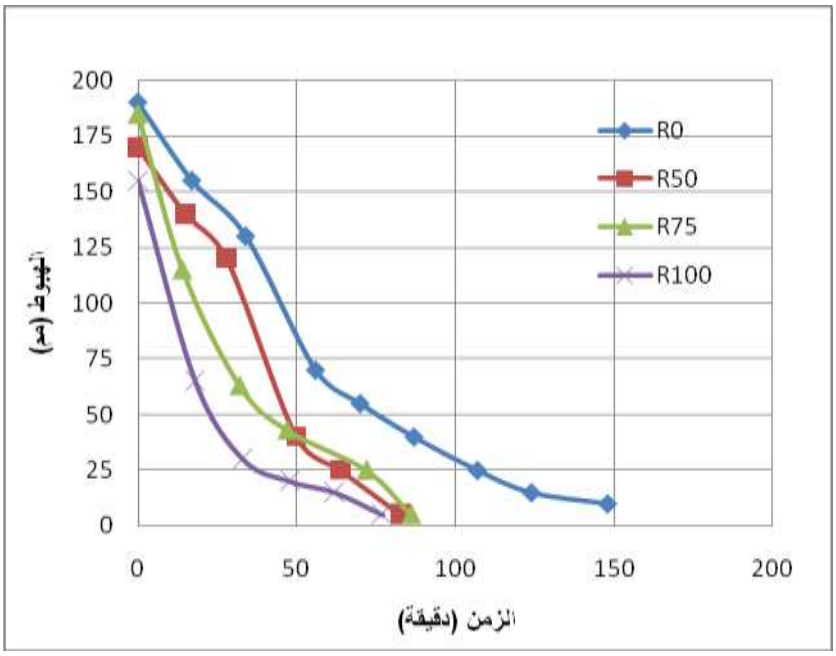
يوضح الشكل (5) قيم هبوط المخروط للخلطات الأربعة، والشكل (6) يوضح معدل فقدان الهبوط خلال فترتين الأولى من 0–40 دقيقة والثانية من 40–80 دقيقة. تم استخدام مخروط أبرامز القياسي 30 سم في تحديد هبوط الخلطة الطازجة. بعد انتهاء الخلط مباشرة تم أخذ خرسانة بمقدار ثلاثة أضعاف حجم المخروط ووضعها على صفيحة جانباً. تم تحديد هبوط المخروط كل 15 دقيقة حتى فقدان قابلية التشغيل والوصول إلى هبوط مقداره 10–5 مم.

يتضح من الشكل(5) أن هبوط المخروط الأولي بعد الخلط مباشرة يقل مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره، فالخلطة المحضرة من 100% من RA أعطت أقل هبوط وهو 155 مم في حين أن الخلطة المحضرة من 100% من الركام الطبيعي أعطت هبوطاً أولياً قدره 190 مم. يعود ذلك إلى المسامية العالية للمونة القديمة الملتصقة على سطح الركام المعاد تدويره والتي تجعله يمتص الماء المحيط به بشكل أسرع عند خلط المكونات بالمقارنة مع الركام الطبيعي. وهذا ما أكدته الدراسات السابقة التي بحثت في خواص هذا النوع من الركام (Tam et al., 2005 [5]; Tam et al., 2007 [7])

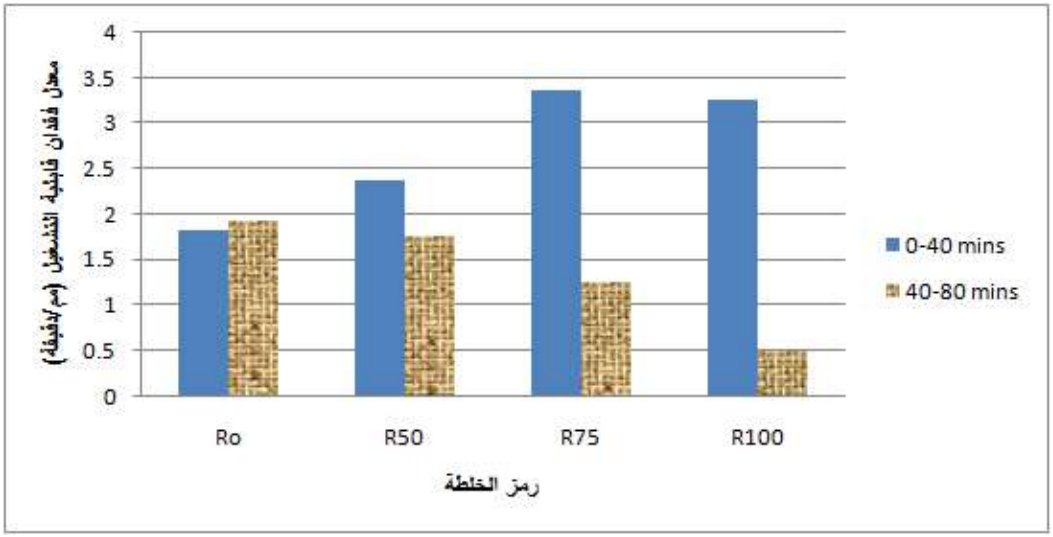
أيضا يمكن ملاحظة أن الخط البياني الممثل لهبوط مخروط الخلطة R50 يكون أقرب لـ R0 من بدايته وحتى مرور زمن قدره 40 دقيقة، بعد ذلك يصبح الخط البياني لـ R50 أقرب للخطوط البيانية التي تمثل هبوط مخروط الخلطتين R100 و R75.

يظهر من الشكل (6) أن معدل فقدان قابلية التشغيل من أجل R100 وR75 خلال الأربعين دقيقة الأولى أكبر بشكل واضح من معدل فقدان قابلية التشغيل خلال الزمن الفاصل بين 40–80 دقيقة من بدء هذا الاختبار.

كما يبيّن الشكل (6) أن معدل فقدان قابلية التشغيل تزداد مع زيادة نسبة الركام المعاد تدويره بعد الخلط مباشرة وحتى 40 دقيقة، حيث من أجل R100 كان معدل فقدان قابلية التشغيل 3.25 مم/دقيقة، في حين أنه 1.83 مم/دقيقة من أجل R0.



الشكل (5) قيم الهبوط للخلطات مع نسب الاستبدال الأربعة مع الزمن



الشكل (6): معدل فقدان الهبوط خلال فترتين الأولى من 0–40 دقيقة والثانية من 40–80 دقيقة من أجل الخلطات الأربعة

- الوزن الحجمي الخرسانة (Concrete density):

يظهر الجدول (5) قيم الأوزان الحجمية لجميع الخلطات الخرسانية في الحالة الرطبة عند الصب وفي الحالة الجافة في اليوم 28. حيث تراوحت قيم الوزن الحجمي للخلطات وهي في الحالة الرطبة بين 2400 كغ/م^3 حتى 2472 كغ/م^3 في حين كانت القيم بين 2334– 2414 كغ/م^3 وهي بالحالة الجافة في اليوم 28. من القيم المدرجة في الجدول (5) يمكن ملاحظة أن الوزن الحجمي ينخفض كلما ازداد محتوى الخلطة الخرسانية من الركام المعاد تدويره، يعود ذلك إلى انخفاض الوزن الحجمي للركام المعاد تدويره بالمقارنة مع الركام الطبيعي نتيجة المونة الاسمنتية القديمة الملتصقة بسطحه.

الجدول (5): الوزن الحجمي الرطب والجاف لخلطات البحث

نسبة RA%	0	50	75	100
الوزن الحجمي الرطب كغ/م^3	2472	2425	2419	2400
الوزن الحجمي الجاف كغ/م^3	2414	2366	2341	2334

- مقاومة الضغط (Compressive strength):

يظهر الجدول (6) قيم مقاومات الضغط لجميع الخلطات في عمر 7 ،28 ،56 يوم حيث كل قيمة هي وسطي مقاومة الضغط لثلاث مكعبات. ويوضح الشكل (7) مقاومات الضغط لهذه الأعمار 7، 28، 56 يوم والمدرجة في الجدول (6) من أجل R0، R50، R75، R100، كما يوضح الشكل (8) نسبة مقاومات الضغط لهذه الخلطات في هذه الأعمار مقارنة مع مقاومة الضغط لـ R0. تبين النتائج أن قيم مقاومة الضغط تنخفض كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره في الخلطة.

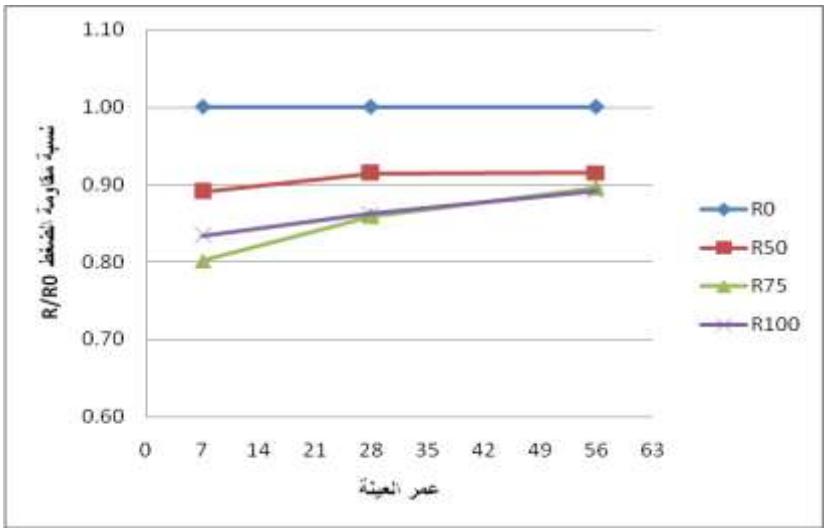
إن مقاومات الضغط في اليوم 28 للخلطات R50، R75، R100 كما هو واضح من الشكل (7) كانت أخفض بمقدار 8%، 14%، 14% على التتالي من مقاومة الضغط للخلطة R0. أي أن مقاومة الضغط لـ R50 لم تتأثر بشكل كبير، وبالتالي قد يساعد استخدام الإضافات في تقليص الفارق بين R50 وR0 أكثر والحصول على خرسانة مقاومتها للضغط شبيهة بالخرسانة المنتجة من ركام طبيعي فقط عند اعتماد خليط بنسبة 50% من الركام الخشن المعاد تدويره و50% من الركام الخشن الطبيعي في الخلطة الخرسانية.

الجدول (6): مقاومات الضغط عند أعمار مختلفة

رمز الخلطة	نسبة RA%	مقاومة الضغط نيوتن/مم^2		
		اليوم		
		7	28	56
R0	0	28	37	41
R50	50	25	34	37
R75	75	22	32	36
R100	100	23	32	36

نلاحظ من الشكلين (7، 8) أن مقاومات الضغط لـ R75 و R100 متقاربة من بعضها جدا عند جميع الأعمار وتقترب من R50 مع التقدم بالعمر قد يفسر ذلك أن كلما زادت كمية الركام المعاد تدويره في الخلطة كلما زادت نسبة المسامات وبالتالي كمية الماء المختزنة ضمنها والتي تساعد على استمرار تفاعلات الإماهة مع الإسمنت والحصول على مقاومة على الضغط إضافية مع الزمن.

الشكل (7): مقاومة الضغط عند نسب مختلفة من الركام المعاد تدويره في عمر (7، 28، 56) يوم



الشكل (8): نسبة مقاومة الضغط من أجل نسب مختلفة من الركام المعاد تدويره بالمقارنة مع مقاومة الضغط للخلطة التقليدية R0 في عمر (7، 28، 56) يوم

مقاومة الشد (Splitting strength):

نجد في الجدول (7) قيم مقاومات الشد بالفلق لجميع الخلطات في عمر 28 يوم حيث كل قيمة هي وسطي مقاومة الشد بالفلق لثلاث أسطوانات. نلاحظ من خلال القيم التي يظهرها الجدول أدناه أن السلوك على الشد مماثل للسلوك على الضغط، حيث تنخفض المقاومة على الشد كلما زادت نسبة الركام المعاد تدويره في الخلطة.

الجدول (7): مقاومات الشد بالفلق ومعامل المرونة عند اليوم 28

رمز الخلطة	نسبة %RA	مقاومة الشد بالفلق نيوتن/مم2	معامل المرونة GPa
R0	0	2.76	30.90
R50	50	2.36	25.27
R75	75	2.20	22.80
R100	100	2.16	22.10

نجد من القيم الموضحة في الجدول (7) وبالمقارنة مع الخلطة R0 فإن مقاومات الشد بالفلق للخلطات R50، R75، R100 أخفض بمقدار 14%، 20%، 22% على التتالي في اليوم 28،وبالتالي فإن مقاومة الشد بالفلق كانت أكثر تأثراً باستخدام الركام المعاد تدويره من مقاومة الضغط.

- معامل المرونة (Modulus of elasticity):

بمقارنة جميع قيم معامل المرونة للخلطات الخرسانية في هذا البحث والموضحة في الجدول (7) في عمر 28 يوم نجد أن معامل المرونة ينخفض كلما زاد محتوى الركام المعاد تدويره، وبالمقارنة مع الخلطة R0 تم تسجيل انخفاض بمقدار 19%، 24%،25% للخلطات R50، R75، R100 على التتالي. أي أن معامل المرونة كان الأكثر تأثرا عند استخدام نسبة 100% من الركام المعاد تدويره من بقية العوامل.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث دراسة تأثير استخدام الركام المعاد تدويره من الخرسانة في الخلطة الخرسانية وبنسب متفاوتة على الخصائص الميكانيكية للخلطة الخرسانية حيث تبيّن ما يلي:

من خلال هذه الدراسة التجريبية تبين أن كثافة الخلطة المنتجة من ركام معاد تدويره وقابلية تشغيلها أقل من الخلطة التقليدية، كذلك ظهر من الخصائص الميكانيكية التي تم دراستها أن مقاومة الضغط، الشد ومعامل المرونة تنخفض مع زيادة محتوى الركام المعاد تدويره.

استخدام خليط بنسبة 50% من الركام المعاد تدويره أعطى مقاومات ضغط أخفض بـ 8% من مقاومة الخرسانة التقليدية.

استخدام نسبة 75% من الركام المعاد تدويره غير مجدية كثيراً فقد أعطت قيم للبارامترات المدروسة قريبة من القيم التي أعطتها الخلطة التي تحوي 100% من الركام المعاد تدويره.

تأثّر معامل المرونة بشكل واضح عند استخدام الركام المعاد تدويره لذلك لا بد من الانتباه إلى هذه المسألة عندما يتم استخدام هذا النوع من الخرسانة، من حيث تأثير ذلك على قساوة العناصر الإنشائية وانتقالاتها.

يمكن استخدام الخرسانة المنتجة من ركام معاد تدويره في العناصر الخرسانية الغير حاملة كالارضيات الخرسانية، تصنيع البلوك، وأيضا في أعمال الطرق... الخ

المزيد من الأبحاث يجب أن تجرى لتحسين سلوك هذا النوع من الخرسانة إما بتخفيض نسبة الماء إلى الإسمنت أو بمحاولة الحصول على ركام معاد تدويره بجودة عالية أو من خلال استخدام إضافات كالألياف، المواد البوزولانية وغيرها.

توضيح:

تمّ إجراء هذا البحث في جامعة دمشق كليّة الهندسة المدنية كأحد المتطلبات لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة الإنشائية، في الفترة ما بين شهر نيسان 2012 لغاية آذار 2014.

المراجع:

1- PAUL, S. *Mechanical Behaviour And Durability Performance Of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate*. Master's Thesis .The Department Of Civil Engineering Of The University Of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa, 2011, 128.

2- MURALI, G.; VIVEK, C.M.; RAJAN, G.; JANANI, N. *Experimental Study On Recycled Aggregate Concrete*. International Journal of Engineering Research and Applications, Vol 2, 2012, 407 -410.

3- MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V., MARINKOVIĆ, S. *Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production*. Sustainability, Vol. 2, 2010, 1204-1225.

4- JANKOVIĆ, K.; NIKOLIĆ, D.; BOJOVIĆ, D.; LONČAR, L.; ROMAKOV, Z. *The Estimation Of Compressive Strength Of Normal And Recycled Aggregate Concrete*. Architecture and Civil Engineering, Vol. 9, No 3, 2011, 419 – 431.

5- TAM, V.W; GAO, X. F.; TAM, C.M. *Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.* Cement and Concrete Research, Vol 35, 2005, 1195–1203.

6- MONTGOMERY, D. G. *Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate*. SUSTAINABLE CONSTRUCTION, 1998, 287-296.

7- TAM, V.W; TAM, C.M.; LE, K. N. *Removal Of Cement Mortar Remains From Recycled Aggregate Using Pre-Soaking Approaches***.** Resources, Conservation and Recycling, Vol 50, 2007, 82–101.

8- POON, C. S., SHUI, Z. H., LAM, L. and KOU, S. C. *Influence Of Moisture States Of Natural And Recycled Aggregates On The Slump And Compressive Strength Of Hardened Concrete*. Cement and Concrete Research, 2004, 31–36.

9- KATZ, A. *Properties Of Concrete Made With Recycled Aggregate From Partially Hydrated Old Concrete*. Cement and Concrete Research, Vol 33, 2003, 703-711.

10- RAHAL, Kh. *Mechanical Properties Of Concrete With Recycled Coarse Aggregate*. Building and Environment, Vol 42, 2007, 407-415.

11- XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Ch. *Mechanical Properties Of Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Loading*. Cement and Concrete Research, Vol 35, 2005, 1187-1194.

12- OIKONOMOU, N. *Recycled Concrete Aggregates*. Cement & Concrete Composites, Vol 27, 2005, 315–318.

13- AKBARI Y. V.; ARORA, N. K.; VAKIL, M. D. *Effect On Recycled Aggregate On Concrete Properties***.** International Journal of Earth Sciences and Engineering, Vol 04, N^{o}.6, 2011, 924-928.

14- ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A., BARRA, M. *Influence Of Amount Of Recycled Coarse Aggregates And Production Process*. Cement and Concrete Research, Vol 37, 2007, 735-742.

15- KONIN, A.; KOUAIDO, D. *Influence Of Cement Content On Recycled Aggregates Concrete.* Modern Applied Science, Vol. 5, N^{o}. 1, 2011, 23-31.

16- PARK, S. *Recycled Concrete Construction Rubble As Aggregate For New Concrete*. Building Research Association of New Zealand, N^{o}. 86, 1999, 1-20.

17- ACI 211.1-91. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. ACI Committee 211, 2002,1-38.

18- ASTM. *Standard Specifications from American Society for Testing and Materials*, US , 2004.