مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (40) العدد (2) 2018
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (40) No. (2) 2018

Adapting the usage of recycled debris aggregates in producing roller compacted concrete

Dr. Ali Kheirbek*
Dr. Rami Hanna **
Ali Ibrahim ***

(Received 13 / 12 / 2017. Accepted 5 / 4 / 2018)

□ ABSTRACT □

Recycling waste demolition process is considered on aim which the civil engineer sought to realise for a long time, especially after the rapid development in construction works which forced the specialists to seek for new scientific methods to make use of the tremendous quantities produced of waste demolition per year. Recycled aggregates proved that it can be greatly used on a large scale in different engineering works and modern applications such as roller compacted concrete which increasingly is being used due to the great technical development and the increasing importance and cost of road net works that has required developing techniques of designing and executing paving roads in whichcase is using available resources. Therefore our research has concentrated on making roller compacted concrete by using recycled aggregates (concrete, block, ceramic, and tiles debris) of demolished buildings in Lattakia. Doing so, we depend on definite methods for treating these materials in way to suit the technical requirements of aggregates diameters and their distribution in the whole mixture. We have finally arrived at the possibility of making roller compacted concrete by using debris aggregates with cubic resistance exceed 300kg/cm^2, Eventually this shows that is practically considered an excellent application for using recycled aggregates.

Keys words : Debris, Recycled aggregates, Roller compacted concrete, Road pavement.

***Professor, Department Of Management Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

****Associate Professor, Department Of Transportation Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

*****Master Student, Department Of Transportation Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria..**

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (40) العدد (2) 2018
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (40) No. (2) 2018

ملاءمة استخدام حصويات الأنقاض المعاد تدويرها في صناعة البيتون المرصوص بالمداحي

الدكتور علي خيربك *
الدكتور رامي حنا **
علي ابراهيم ***

(تاريخ الإيداع 13 / 12 / 2017. قُبِل للنشر في 5/ 4 / 2018)

□ ملخّص □

تعتبر عملية إعادة استخدام مخلفات البناء هدفاً سعى المهندس المدني إلى تحقيقه منذ زمنٍ بعيد خاصةً بعد التطور العمراني المتسارع الذي أجبر المختصين على البحث عن منهجياتٍ علميةٍ للاستفادة من الكميات الهائلة المنتجة سنوياً من نفايات الهدم، فقد أثبتت الحصويات المعاد تدويرها عالمياً قابليةً كبيرةً للاستخدام في مختلف الأعمال الهندسية والتطبيقات الحديثة كالبيتون المرصوص بالمداحي الذي بدأ استخدامه بالتزايد نتيجة التطور التكنولوجي الهائل وتزايد أهمية وتكلفة شبكات الطرق ماتَطَلّب تطوير تقنياتٍ لتصميم وتنفيذ رصفٍ طرقيٍ من المواد الأولية المتاحة، لذلك فقد تركز بحثنا على تصنيع بيتونٍ مرصوصٍ باستعمال الحصويّات المعاد تدويرها (بيتون، بلوك، بلاط، سيراميك) من أحد الأبنية المتهدمة في مدينة اللاذقية معتمدين منهجيّةً محددّةً لمعالجة هذه المخلّفات بحيث تلبي المتطلّبات الفنيّة لأقطار الحصويات وتوزّعها في المزيج الكليّ للبيتون، وقد توصلنا إلى إمكانية تصنيع البيتون المرصوص باستعمال حصويات الأنقاض بمقاوماتٍ مكعبية تجاوزت الـ $300kg/cm^2$ مايدل على أن البيتون المرصوص يعتبر تطبيقاً مميزاً لاستعمال الحصويات المعاد تدويرها.

الكلمات المفتاحية: الأنقاض، الحصويات المعاد تدويرها، البيتون المرصوص بالمداحي، الرصف الطرقي.

* أستاذ – قسم هندسة وإدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.
** أستاذ مساعد – قسم هندسة المواصلات والنقل – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية –سورية.
*** طالب ماجستير – قسم هندسة المواصلات والنقل – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية

مقدمة :

تعتبر عملية إعادة تدوير نفايات الهدم والإنشاء أكثر المنهجيات نجاحاً بين تلك التي اعتمدتها المؤسسات المختصة عالمياً كطريقةٍ للتخلص من هذه النفايات بعد أن كانت تستهلك مساحاتٌ واسعةٌ من الأراضي لإنشاء المطامر والحراقات مثلاً، الأمر الذي حثّ المعنيين على تطوير أفقٍ جديدةٍ للاستفادة من الكميات الهائلة التي تنتج سنوياً من نفايات الهدم بهدف وضع أسسٍ واستراتيجياتٍ ثابتة لمعالجة هذه النفايات وتحويلها إلى حصوياتٍ تؤمن ديمومةً واستمراريةً أطول بالنسبة لمصادر الحصويات الطبيعية (غير المتجددة)، والتي باتت تعاني مؤخراً من أزمات حادة ونضوبٍ في الإمكانيات لأسبابٍ عديدةٍ يأتي في مقدمتها الاستخدام الجائر، ولذلك فقد أجريت أبحاثٌ علميّة مكثّفة بغية التحديد الدقيق لمواصفات الحصويات المعاد تدويرها لتحديد مدى قابليتها للاستخدام في الأعمال الهندسية الضخمة، حيث أسهمت الاعتقادات السابقة حول الخصائص الميكانيكية السيئة (المتدنية) للحصويات المعاد تدويرها إلى استخدامها (حتى في الحالات المتفائلة) بشكلٍ محدودٍ في الأعمال الهندسية قليلة الأهمية، إلى أن أثبتت كفاءتها العالية كبديلٍ مرغوبٍ للحصويات الطبيعية فبدأت تستخدم في أرقى التطبيقات الهندسية الحديثة كالبيتون المرصوص بالمداحي الذي بدأ استخدامه عالمياً نتيجة التطور التكنولوجي الهائل وتغير أساليب الإنشاء فضلاً عن تزايد أهمية شبكات الطرق وتكلفتها العالية ما تَطَلّب تطوير أساليبٍ وتقنياتٍ لتصميم وتنفيذ رصفٍ طرقيٍ من المواد الأولية المتاحة كالـ RCC (Roller Compacted Concrete) والذي يعتبر أحد التقنيات الهامة التي تتيح التعديل والتغيير كشكلٍ من أشكال الرصف البيتوني أو الصلب.

في سوريا وحتى وقتٍ قريبٍ، يعتبر استعمال المواد المعاد تدويرها محدوداً جداً، حيث اقتصر على بعض التطبيقات الصغيرة محدودة الأهمية (ردميات طرقية مثلاً.....) رغم ما تملكه هذه المواد من مواصفاتٍ تسمح لها بالاستخدام في مختلف الأعمال الهندسية على اختلاف أهميتها، الأمر الذي جعل هذا الموضوع مثاراً للنقاش، ووجه الأنظار إلى أهمية عملية إعادة التدوير والنتائج المذهلة التي يمكن أن تعود بها (بيئياً، اقتصادياً، اجتماعياً)، ما دفعنا للقيام بهذا البحث الذي سندرس من خلاله إمكانية استخدام نواتج الهدم المعاد تدويرها في صناعة البيتون المرصوص بالمداحي والذي شغل اهتمام الفنيين لاسيما بعد ارتفاع أسعار المشتقات النفطية وصعوبة تأمينها مما أدى إلى تكاليف كبيرة وإضافية عند تنفيذ المجبول الإسفلتي، وقد تم تحديد كفاءة وفعالية الحصويات المعاد تدويرها للاستخدام في هذه التقنية عن طريق لحظ التغيرات التي ستطرأ على خصائص الـ RCC المنتج (المقاومة على الضغط البسيط، التشرب.....) عند استبدال نسبةٍ من حصوياته الطبيعية بحصوياتٍ معادٍ تدويرها.

نعرض فيما يلي بشكلٍ مختصر لمحةً عن أهم تطبيقات الحصويات المعاد تدويرها إضافةً إلى تقديمٍ بسيط عن البيتون المرصوص بالمداحي

1-1. تطبيقات الحصويات المعاد تدويرها:

- الأرصفة البيتونيّة.
- طبقات التأسيس للمنشآت المواصلاتية.
- بلاط الأرصفة.
- صناعة البلوك العازل للصوت.
- مواد الإملاء [1].

2-1. البيتون المرصوص بالمداحي (Roller Compacted Concrete) (RCC)

إن البيتون المرصوص بالمداحي هو أحد الأنواع الخاصة من البيتون، يتكون بشكلٍ رئيسيٍ من نفس المواد التي تشكل البيتون التقليدي (الحصويات، الماء، نسب منخفضة من الاسمنت)، ولكن مايميزه أنه أكثر جفافاً (تماسكاً) بهبوطٍ معدوم [2].

لقد أشارت كودات التصميم البلجيكية (RW99) إلى أن المتطلبات الدنيا المطلوبة لهذا النوع من البيتون المستخدم في الأعمال الهندسية (المواصلاتية) هو (BSC20) و(BSC30)، وبمحتوى من الاسمنت kg/m^3(250-200) ما يتوافق مع مقاومةٍ على الضغط البسيط N/mm^2(20-30) [2].

بدأت الدراسات الفعلية حول إمكانية استخدام الـ RCC في اليابان بحلول عام 1974، حيث استخدمت عديد المشاريع في البداية تقنية الـ (RCC)، وهي تعتمد على استخدام أقل محتوى ممكن من الاسمنت بما يحقق متطلبات المقاومة، كما تم استخدام الرماد المتطاير كإضافةٍ في بعض المشاريع [3].

إن الحصويات المكسرة هي الأفضل في خلائط البيتون المرصوص بالدحي بسبب الحواف الحادة والمتعشقة للجزيئات، التي تساعد على الحد من الفصل الحبيبي، وتوفير مقاوماتٍ أعلى، وتعشقٍ أفضل للحصويات عند الوصلات والشقوق [4].

عرف المعهد الأميركي للبيتون (ACI) البيتون المرصوص بالمداحي بأنه مزيج صلب (قاس) نسبياً من الحصويات، الماء، المواد الاسمنتية، يرص باستخدام المداحي الاهتزازية [5].

يشير الـ (RCCP) (Roller Compacted Concrete Pavement) إلى الرصف البيتوني الذي يمد ويدحى باستعمال معداتٍ ثقيلةٍ وبأليةٍ مشابهةٍ لتلك التي تتم عند استعمال الرصف البيتوميني [5].

إن أداء البيتون المرصوص بالمداحي شبيه بأداء الرصف البيتوني التقليدي من حيث المقاومة والمتانة، فضلاً عن سرعة تنفيذه حيث يمكن فتح الطريق للمرور بزمنٍ أسرع منه في حالة الرصف الصلب البيتوني التقليدي [5] .

أهمية البحث وأهدافه:

- ضرورة إيجاد آلياتٍ وطرقٍ معينةٍ جديدةٍ للاستفادة من المواد المعاد تدويرها والتي أصبحت تنتج بكمياتٍ كبيرةٍ سنوياً في مختلف أنحاء العالم.(البحث في إمكانية استعمالها في البيتون المرصوص بالمداحي).
- حماية الموارد الطبيعية غير المتجددة (مقالع، شواطئ....) وبالتالي المساهمة في إطالة أمد المصادر الطبيعية للحصويات.
- الوصول إلى التصميم الأمثل للبيتون المرصوص بالمداحي كرديفٍ اقتصاديٍ ومرغوب للمجبول الإسفلتي فضلاً عن إيجاد الآلية المثلى لصناعة العينات مخبرياً.

طرائق البحث ومواده:

تم اعتماد المنهجية التجريبية في إجراء البحث من خلال اعتماد نسب استبدالٍ مختلفةٍ للحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها ودراسة تغير خصائص البيتون من أجل كل نسبةٍ، وبالتالي معرفة مدى جودة الخليط المنفذ وملاءمة نسب المزج المدروسة لتنفيذ البيتون المطلوب، حيث تم إحضار كمية كافية من أنقاض الهدم من

أحد مواقع الأبنية المهدومة في مدينة اللاذقية (المشروع الأول) وذلك لمعالجتها مخبرياً بما يشمل ذلك من عمليات الطحن والفرز بغية توصيفها وإعادة استخدامها في إنتاج العينات البيتونية المخبرية (البيتون المرصوص بالمداحي)، كما تم إحضار الحصويات الطبيعية (بحص + رمل) والإسمنت من أحد المراكز المخصصة لبيع مواد البناء في مدينة اللاذقية.

وقد تم تقسيم العمل المخبري (التجريبي) إلى المراحل الآتية:

- **المرحلة الأولى:** إحضار نفايات وأنقاض الهدم من موقع البناء المهدوم في المشروع الأول (مدينة اللاذقية)، وقد اشتملت هذه النفايات على بقايا (بيتون، بلوك، سيراميك وبلاط منزلي).
- **المرحلة الثانية:** متابعة عملية فرز الأنقاض والتي بدأت في الموقع (يدوياً)، ثم البدء بعملية المعالجة الأولية (التكسير اليدوي) للإحضارات باستخدام مطرقة لتحويلها إلى حجومٍ أصغر تتيح متابعة عملية المعالجة باستخدام الكسارة الآلية الموجودة في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين.
- **المرحلة الثالثة:** إجراء عملية المعالجة النهائية باستعمال الكسارة الألية ليكون القطر الأعظمي النهائي للحصويات المنتجة بحدود 19mm.

يبين الشكل 1 الكسارة الآلية الموجودة في مخير ميكانيك التربة والتي يتم التحكم بقطر الحصويات الناتجة عن عملية الكسر من خلال ذراعٍ متحركٍ بشكلٍ دوراني، نقوم من خلاله بتكبير أو تصغير فتحة الكسارة وبالتالي التحكم بقطر الحصويات، تتم عملية الطحن عبر هذه الكسارة من خلال احتكاك لوحين معدنيين يتحركان بشكل متناوب.

الشكل 1 الكسارة الألية

- **المرحلة الرابعة:** توصيف الحصويات المعاد تدويرها والحصويات الطبيعة عبر إجراء التجارب المخبرية اللازمة من أجل الوصول إلى التحديد الدقيق لخصائص الحصويات المستعملة.
- **المرحلة الخامسة:** اعتماد التصميم الأمثل والمحقق لمختلف المتطلبات ثم البدء بإنتاج عينات البيتون المرصوص وفق نسب الاستبدال المختلفة.
- **المرحلة السادسة:** إجراء الاختبارات اللازمة على عينات الـ RCC (المقاومة على الضغط البسيط، التشرب، الكتلة الحجمية) لدراسة تأثير نسب الاستبدال على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون.

3-1. مواصفات المواد الداخلة في خلطات البيتون المرصوص

أما المواد المستخدمة لإنجاز البحث التجريبي فكانت:

a) **رمل نبكي من مصادر محلية** Dmax = 1mm، معامل نعومته قدره Mf=1.74، ومكافئه الرملي ES=67.5%، ووزن حجمي صلب ρ_s=2.424 g/cm^3.

b) **رمل عدسي من مصادر محلية** Dmax = 5mm، معامل نعومته قدره Mf=3.49، ومكافئه الرملي ES=81.3%، ووزن حجمي صلب ρ_s=2.543 g/cm^3.

c) **بحص طبيعي (حسياء)** : La = 12.84% (عامل لوس أنجلوس).

d) **إسمنت بورتلاندي عادي أسود تصنيف I** صنع معمل إسمنت طرطوس بصنف 32.5.

e) **ماء للجبل** قابل للاستعمال ويحقق الشروط المطلوبة.

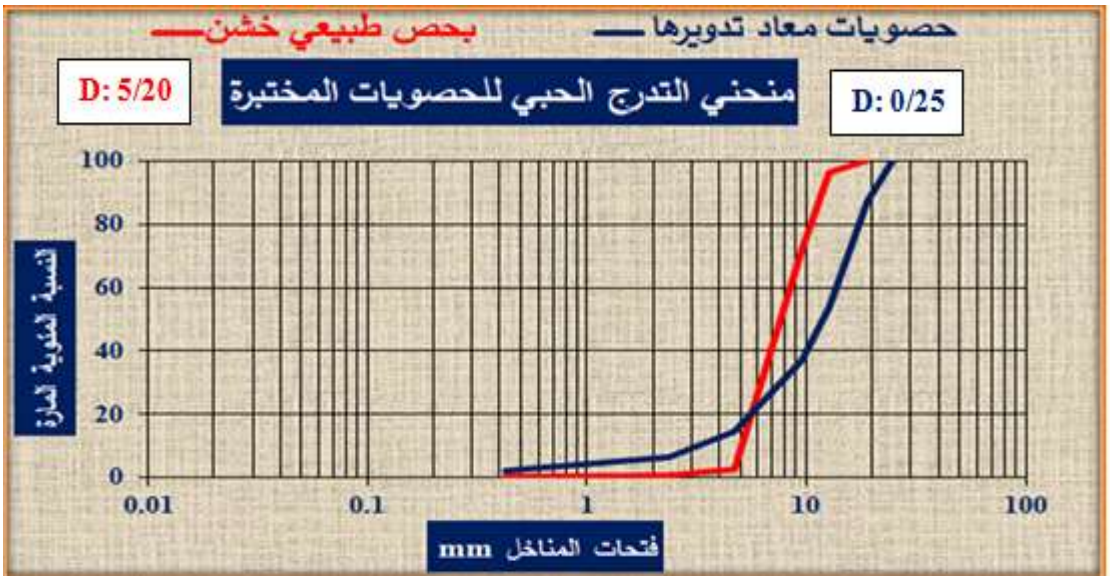
f) **مخلفات وأنقاض الهدم (بيتون، بلوك، بلاط، سيراميك):** تم الحصول عليها من أحد مواقع الأبنية المهدومة في مدينة اللاذقية والتي اشتملت على بقايا بيتونية ومواد سيراميكية إضافة إلى البلوك والبلاط المنزلي.

3-1-1. توصيف الإحضارات

أجريت مجموعة من التجارب المخبرية للوصول إلى التوصيف الدقيق لمواصفات الحصويات الطبيعية والحصويات المعاد تدويرها، وهذه التجارب هي:

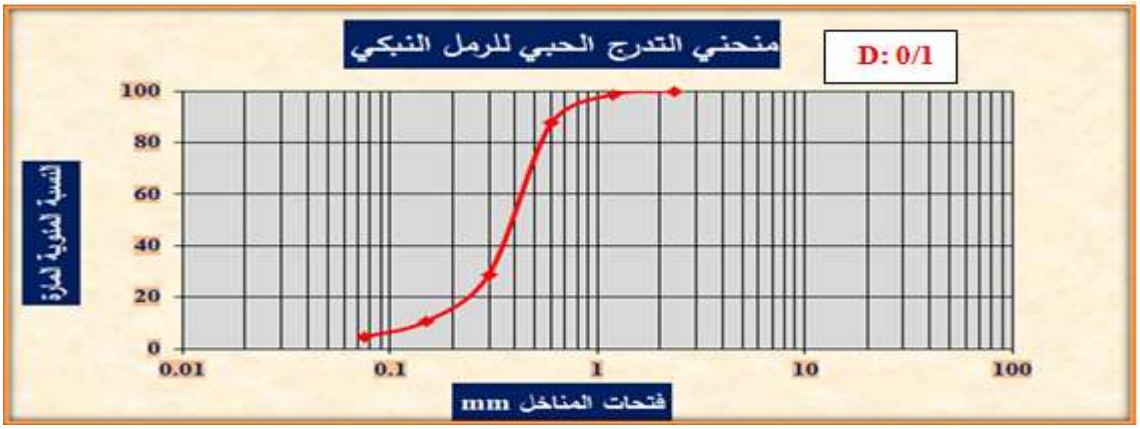
التحليل الحبي، الكتلة الحجمية الظاهرية والكتلة الحجمية الصلبة، لوس انجلوس على البحص، المكافئ الرملي، تجربة التشرب.

يبين الشكل 2 أدناه منحنيات التدرج الحبي للحصويات الطبيعية والحصويات المعاد تدويرها التي أدخلت في التصميم وفق النسب التالية (60% بيتون، 20% بلوك، 20% سيراميك)، حيث يبدو المنحنيان متقاربين نسبياً مما سيخفف من تأثير بارامتر التدرج الحبي على خصائص ومواصفات البيتون الناتج.



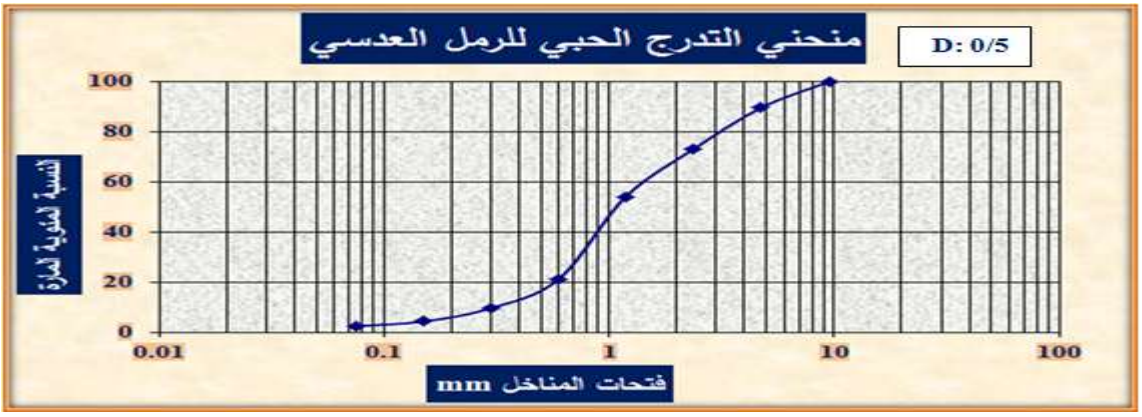
الشكل 2 منحني التدرج الحبي الخاص بالحصويات المختبرة

أما منحني التدرج الحبي للرمل النبكي فهو موضح في الشكل 3:



الشكل 3 منحني التدرج الحبي الخاص بالرمل النبكي

يبين الشكل 4 منحني التدرج الحبي الخاص بالرمل العدسي:



الشكل 4 منحني التدرج الحبي الخاص بالرمل العدسي

يبين الجدول (1) نتائج تجربتي الكتلة الحجمية الظاهرية والصلبة للحصويات المختبرة:

الجدول (1): الكتلة الحجمية الظاهرية والصلبة للحصويات المختبرة

العينة	الكتلة الحجمية الظاهرية kg/l	الكتلة الحجمية الصلبة kg/l
نواتج هدم البيتون	1.229	2.460
نواتج هدم السراميك	1.115	2.242
نواتج هدم البلوك	1.172	2.214
مزيج نواتج الهدم	1.226	2.396
الرمل النبكي	1.670	2.424
الرمل العدسي	1.669	2.543
البحص الطبيعي	1.495	2.618

يبين الجدول (2) نتائج تجربتي لوس أنجلوس والتشرب بالنسبة للحصويات المستخدمة:

الجدول (2): قيم عامل الاهتراء (لوس أنجلوس) والتشرب للحصويات المستخدمة

العينة	لوس أنجلوس %	التشرب %
نواتج هدم البيتون	35.18	4.73
نواتج هدم السراميك	31.3	7.8
نواتج هدم البلوك	65.76	6.07
مزيج نواتج الهدم	33.42	5.27
البحص الطبيعي	12.84	1.4

أما قيم المكافئ الرملي فكانت 67.5% بالنسبة للرمل النبكي و81.3% بالنسبة للرمل العدسي، يمكن قبول هذه القيم في البيتون المرصوص بالمداحي.

3-2. تصميم الخلطة البيتونية [6, 7].

- تم اعتماد الطرق المتبعة عموماً في تصميم الهيكل الحصوي للخلطات البيتونية، وتعتبر الطريقة الفرنسية (Dreux-Gorisse) من أشهر هذه الطرق، وقد تم التصميم على مرحلتين وهما: تصميم العجينة الرابطة وتصميم الخلطة الحصوية، ونتيجةً لذلك تم تحديد نسب مختلف مكونات الخليط باستثناء الماء الذي استوجب تحديد نسبته إجراء اختبار بروكتور من أجل الوصول بشكلٍ دقيق إلى الكثافة الجافة العظمى والتي تتوافق مع نسبة الماء المثالية، باعتبار أن جودة البيتون المرصوص تعتمد بشكلٍ رئيسي على نجاح وتكامل عمليتي التصميم والتنفيذ أكثر من اعتمادها على خصائص المكونات بحد ذاتها.
- تطلب تصميم الخلطة البيتونية لعينات الـ RCC باستخدام الطريقة الفرنسية (طريقة درو غوريس) إجراء تجربة التحليل الحبي لجميع المواد الحصوية الداخلة في تركيب الخلطة البيتونية ورسم المنحنيات الحبية وفقها، فهي تتميز بأنها من بين الطرق القلائل التي تعتمد على شكل التدرج الحبي للحصويات الداخلة في تصميم الخلطة، حيث:
  - لمنحنيات التدرج الحبي ومعامل الحصويات دور كبير في التصميم.
  - تأخذ بعين الاعتبار تأثير المكونات الأخرى على مواصفات الخلطة.
  - تتميز بالاقتصادية.
- تم تثبيت محتوى الإسمنت في كل الخلطات ($250Kg/m^3$) (وهي قيمة تتلاءم مع هذا النوع من البيتون) لمنع تداخل البارامترات المؤثرة على خواص البيتون المنتج، حجم الهواء $20L/m^3$، يمكن أن يعطي هذا العيار من الإسمنت مقاومة تصميمية على الضغط البسيط بحدود $200\ kg/cm^2$ للبيتون المرصوص المنتج.
- تم اعتماد 6 خلطات للبيتون المرصوص بنسب استبدال مختلفة للحصويات الطبيعية N بالحصويات المعاد تدويرها R (تم المزج وفق النسب (60% بيتون، 20% سيراميك، 20% بلوك))، وكانت نسب

الاستبدال هي:(0، 10، 20، 30، 50، 100)%، بحيث يشير الرمز CN100 إلى بيتون بحصويات طبيعية دون استبدال، والرمز CR10 إلى بيتون استخدمت فيه الحصويات المعاد تدويرها بنسبة 10%.

يبين الجدول الآتي الأوزان اللازمة بالـ kg لصناعة واحد متر مكعب من البيتون المرصوص:

الجدول (3): أوزان مكونات الـ RCC اللازمة لصناعة متر مكعب واحد

الخلطة	بحص طبيعي (kg/m^3)	حصويات معاد تدويرها (kg/m^3)	رمل نبكي (kg/m^3)	رمل عدسي (kg/m^3)	إسمنت (kg/m^3)	ماء (بروكتور) (kg/m^3)
CN100	946	-	365	575	250	147
CR10	874	93	360	567	250	142
CR20	847	202	335	527	250	133
CR30	742	303	335	527	250	133
CR50	580	554	299	470	250	130
CR100	-	1164	277	335	250	129

3-3. صناعة العينات البيتونية مخبرياً

اعتمدنا في صب العينات البيتونية على الخلط اليدوي وليس الخلط الآلي (في الجبالة) حيث نقوم بوزن كل مكونٍ في الخلطة على حدا بعد أن يتم تجفيفها في الفرن لمدة يومٍ كاملٍ بدرجة 105 درجة مئوية، وقد تم اختبار آليتين مخبريتين لصناعة العينات بغية تحديد الأسلوب الأمثل والأكفأ، ففي البداية قمنا بصناعة عينات أسطوانية من البيتون المرصوص بالمداحي ورصها بمطرقة مارشال اليدوية (50 طرقة)، إلا أنها عانت من انفصال وتكسر الحواف عند انتزاع العينات من القالب كما أن بعضاً منها تكسر في خزان الماء بسبب الرص غير الكافي، وفي خطوةٍ تالية تم تصنيع العينات عبر رصها بـ (65 طرقة) بمطرقة مارشال وقد أبدت تحسناً ملموساً لتجنب تفتت وتكسر الحواف مع التأكيد أن عملية الرص تتم على طبقتين بحيث تتلقى كل طبقة عدد الطرقات المعتمد، علماً أنه تم اعتماد عدد الطرقات (65 طرقة) بشكلٍ رئيسي في تصنيع عيناتنا.

يبين الشكل 5 عملية رص العينات يدوياً بمطرقة مارشال:

الشكل 5 استخدام مطرقة مارشال في رص عينات البيتون المرصوص

يمكن القول أن جودة العينات التي قمنا بتصنيعها تدرجت بالجودة مع زيادة عدد الطرقات (طبقاً للشكل ومع تزايد قيم المقاومة على الضغط البسيط) حيث أن رص العينات بـ (75 طرقة) أعطت نتائج أفضل من حيث (الكثافة، المقاومة....) ولكن ذلك يبدو غير مجدٍ من الناحية العملية لأن الرص يتم بشكل يدوي ويعتمد بشكلٍ كبير على جهد المشغل، ما سيجعل عملية صناعة العينات تتطلب جهداً كبيراً وزمناً طويلاً قد يؤدي إلى دخول الإسمنت في مرحلة التصلب أثناء التنفيذ مما سيؤثر سلباً على المقاومات.

يوضح الشكل 6 عينات الـ RCC المصنعة عبر رصها بطريقة مارشال (65 طرقة):

الشكل 6 عينات الـ RCC المرصوصة بمطرقة مارشال

- أما الطريقة الثانية المتبعة في صناعة العينات مخبرياً فقد اعتمدت على رص المكعبات البيتونية بضغطها بالمكبس الهيدروليكي الموجود في مخبر تجريب المواد في كلية الهندسة المدنية، حيث يحدد الوزن الأعظمي الذي يتلقاه القالب المستخدم (15*15*15)cm حسابياً بضرب حجم القالب بقيمة الكثافة العظمى التي يتم الحصول عليها من اختبار بروكتور، وتتم إضافة هذا الوزن إلى القالب أثناء وجوده على طاولة الرج وذلك على عدة طبقات.

يبين الشكل 7 آلية الإملاء للعينة المكعبية أثناء وضعها على الطاولة الاهتزازية (الرجاجة):

الشكل 7 إملاء مكعبات الـ RCC أثناء وضعها على الطاولة الرجاجة

تهدف عملية الرج السابقة إلى إنقاص الحجم قدر الإمكان قبل أن نعرض عينة الـ RCC للضغط بالمكبس الهيدوليكي بهدف تطبيق قوة رص مخبرية تكون بديلاً لضغط المدحلة في الحقل، إلى أن نصل إلى احتواء القالب لكامل الوزن المحدد (نظرياً) وبالتالي يكون قد تم تحقيق الكثافة العظمى المحسوبة نظرياً لهذا الحجم المحدد أي لقالب (15×15×15)cm.

يبين الشكل 8 عملية تعريض عينات البيتون المرصوص للضغط بالمكبس الهيدروليكي:

الشكل 8 وضع القالب في المكبس وتطبيق قوة الرص

يبين الشكل 9 نماذجاً من عينات البيتون المرصوص أثناء وضعها في الماء، بعد 24 ساعة من انتهاء عملية الصب وذلك قبل اختبارها على الضغط البسيط بعمر 3 و7 و14 و28 يوم:

الشكل 9 نماذج من عينات البيتون المرصوص المصنّع

النتائج و المناقشة:

تم اعتماد منهجية (الرج، الرص) المتتالي في صناعة عيناتنا والتي أعطت قيم مقاومةٍ مكعبيةٍ على الضغط البسيط بعمر 28 يوم تجاوزت الـ 30MPa (من أجل مختلف نسب الاستبدال) مقارنة بالعينات المصنعة وفق طريقة مارشال وبنفس نسب الحصويات حيث كانت أقصى قيم المقاومة بحدود MPa(20~18) أي أن نسبة انخفاض المقاومة بلغت مايقارب الـ 40% إذا ماقورنت بتلك وفق المنهجية الأولى، فضلاً عن الصعوبات التي اعترضتنا عند رص عينات البيتون المرصوص باستعمال مطرقة مارشال بسبب الجهد الكبير الذي تتطلبه من المشغل وما حدث من تكسر وتفتت في العينات بسبب الرص غير الكافي.

يوضح الجدول 4 نتائج اختبار المقاومة على الضغط البسيط والتشرب والكتلة الحجمية (الكثافة) لعينات البيتون المرصوص التي صنعت وفق منهجية (الرج، الرص) حيث تم صب 12 عينة لكل خلطة من الخلطات المعتمدة، وقيمة المقاومة المذكورة وفق العمر المحدد هي قيمة وسطية لاختبار ثلاث عينات.

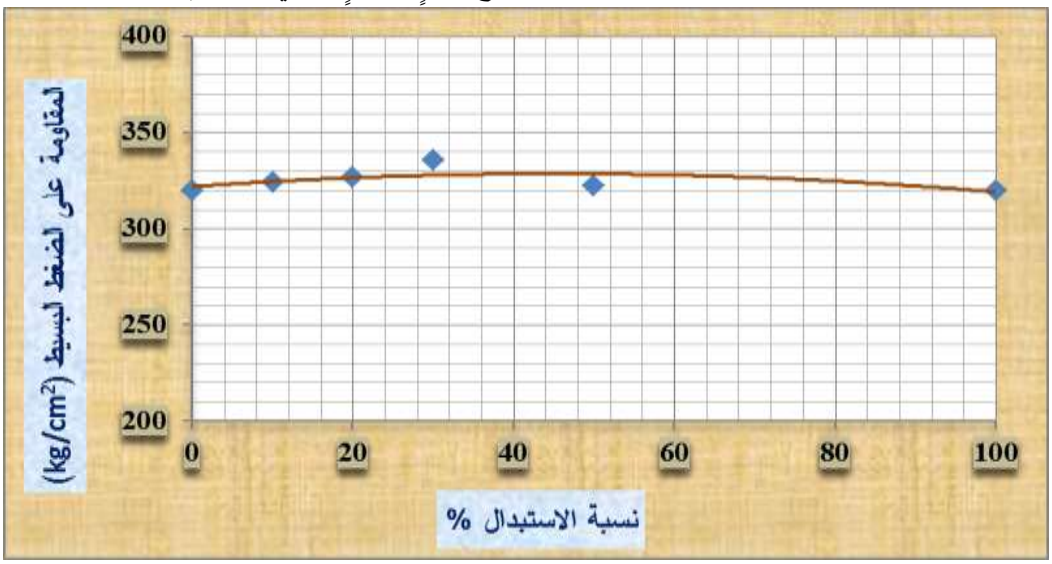
الجدول (4) نتائج الاختبارات المجراة على عينات الـ RCC

الخلطة	مقاومة مكعبية متوسطة بعمر3 يوم kg/cm^2	مقاومة مكعبية متوسطة بعمر 7 يوم kg/cm^2	مقاومة مكعبية متوسطة بعمر14 يوم kg/cm^2	مقاومة مكعبية متوسطة بعمر28 يوم kg/cm^2	درجة التشرب %	الكتلة الحجمية kg/m^3
CN100	180	220	269	320	1.79	2561
CR10	180	224	271	324	1.83	2597
CR20	182	227	271	327	1.87	2601
CR30	182	229	276	336	1.91	2612
CR50	178	222	271	322	1.94	2558
CR100	176	218	267	320	2.01	2503

يبدو واضحاً من الجدول السابق أن تطور مقاومة البيتون المرصوص مع الزمن لم تتأثر عند استبدال حصوياته الطبيعية بنسب متزايدة من الحصويات المعاد تدويرها حيث وصل الـ RCC بعمر 3 أيام (في جميع الخلطات) إلى مايقارب الـ 55% من قيمة مقاومته بعمر 28 يوم، وهذا ما يعتبر مؤشراً إيجابياً على سرعة تطور مقاومة البيتون المرصوص وبالتالي إمكانية فتح الطريق بشكلٍ سريع بعد انتهاء أعمال فرش وتنفيذ الـ RCC، أما نسب مقاومته بعمر 7 و14 يوم إذا ماقورنت مع تلك بعمر 28 يوم فكانت على الترتيب بحدود 70% و85%.

يبين الشكل 10 العلاقة بين نسبة استبدال الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها وقيم المقاومة على الضغط البسيط، حيث يظهر المنحني عدم تأثر مقاومة الـ RCC عند إجراء عملية الاستبدال، بل وكانت قيم المقاومة من أجل جميع الخلطات أعلى قليلاً من بيتون الحصويات الطبيعية الصرفة حتى تلك التي صنعت باستعمال الحصويات المعاد تدويرها فقط CR100 حيث بقيت قيمة المقاومة 32MPa كما في البيتون الطبيعي، وتبدو النسب المثلى للاستبدال بحدود 30% حيث بلغت قيمة المقاومة على الضغط البسيط 33.5MPa بزيادة تقدر بحوالي الـ 5% مقارنةً مع CN100، ويعزى عدم تأثر قيم المقاومة رغم استعمال الحصويات المعاد تدويرها

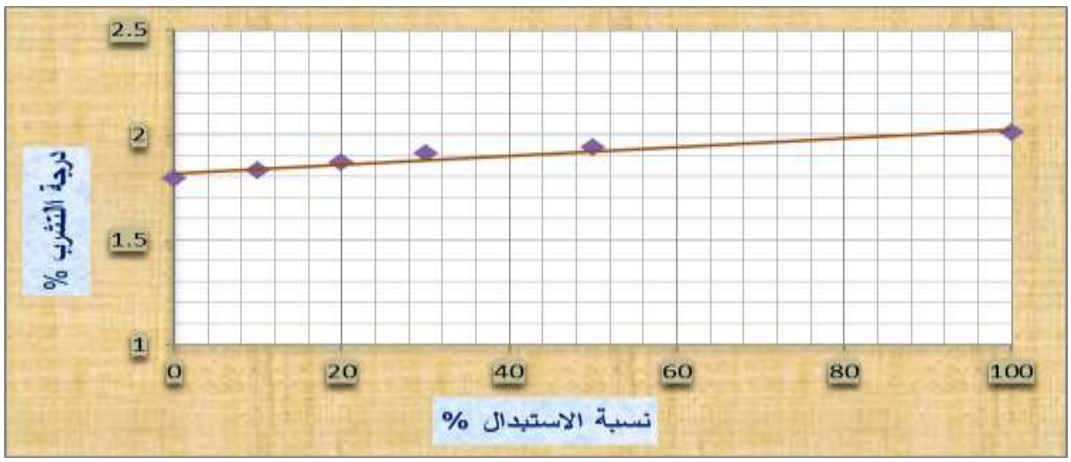
التي تعتبر أقل جودةً (ميكانيكياً وفيزيائياً) من الحصويات الطبيعية إلى ماتحتويه نفايات وأنقاض الهدم من مواد ناعمة تلعب دور المادة المالئة عند رص الـ RCC ما يقود إلى إنتاج بيتونٍ باكتنازٍ مثالي ومقاومةٍ عالية.



الشكل 10 مخطط العلاقة بين نسبة الاستبدال والمقاومة على الضغط البسيط لعينات البيتون المرصوص

أما قيم التشرب لعينات البيتون المرصوص فقد ازدادت بشكلٍ طفيفٍ جداً مع ازدياد نسبة الحصويات المعاد تدويرها بسبب قيم التشرب الأعلى لمكونات مزيج هذه الحصويات (بلوك، سيراميك، بلاط، بيتون)، لكن آلية الرص المتبعة ومحتوى النواعم في الخليط الذي لعب دور المادة المالئة قد خفض من تأثير ارتفاع درجة التشرب للحصويات المعاد تدويرها على تشرب البيتون المنتج، حيث ارتفعت درجة تشرب الـ RCC من 1.79% لـ CN100 إلى 2.01% لبيتون الحصويات المعاد تدويرها CR100 أي لم تتجاوز نسبة الزيادة 12% فقط (موضح في الشكل 11).

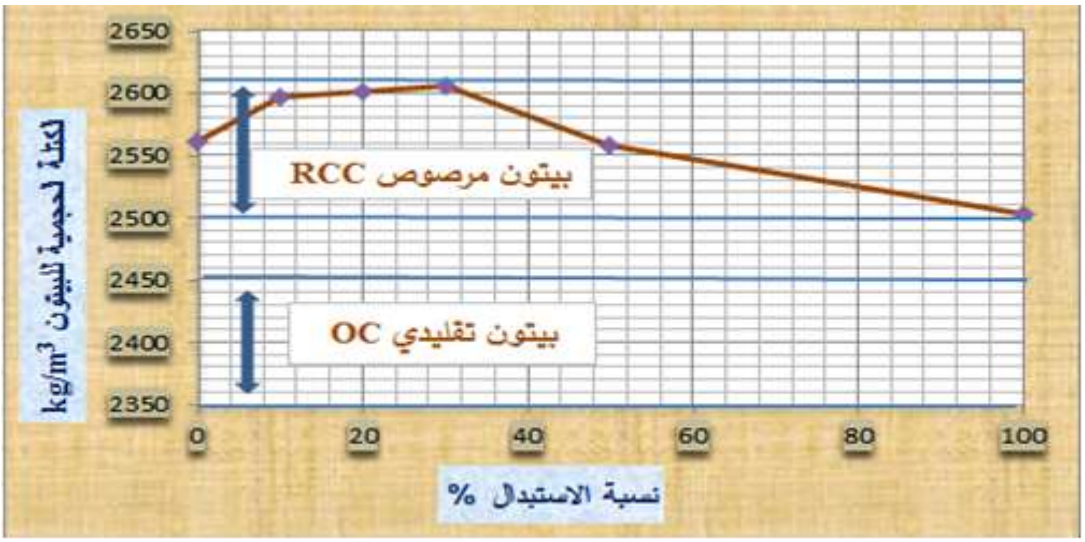
يبين الشكل 11 العلاقة بين درجة تشرب البيتون المرصوص ونسبة الاستبدال من الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها وفق نسب المزج المعتمدة.



الشكل 11 مخطط العلاقة بين نسبة الاستبدال ودرجة التشرب لـ RCC المنتج

لقد أعطت جميع خلطات البيتون المرصوص المحضرة قيماً عاليةً للكتلة الحجمية تجاوزت الـ $2500kg/m^3$ ووصلت إلى $2600kg/m^3$ من أجل بعض نسب الاستبدال، بينما تتراوح قيم الكتلة الحجمية للبيتون التقليدي عادةً بين $(2350\sim2450)kg/m^3$، ولم تؤثر عملية الاستبدال بالحصويات المعاد تدويرها على انخفاض الكتلة الحجمية للـ RCC باستثناء أقصى نسب الاستبدال (CR100) حيث انخفضت بشكل طفيف جداً (2.3%) إذا ماقورنت مع بيتون الحصويات الطبيعية الصرفة، كما نلاحظ أن قيم الكتلة الحجمية لعينات البيتون المرصوص تطورت بشكل مقارب ومشابه جداً لقيم المقاومة على الضغط البسيط حيث حققت نسبة الاستبدال 30% (كمثالٍ) أعلى قيمة للمقاومة $336kg/cm^2$ وهو ماتوافق مع القيمة الأعلى للكتلة الحجمية $2612\ kg/m^3$.

يبين الشكل 12 العلاقة بين نسبة الاستبدال والكتلة الحجمية للـ RCC:



الشكل 12 مخطط العلاقة بين نسبة الاستبدال والكتلة الحجمية للبيتون المرصوص

الاستنتاجات و التوصيات

بعد استخلاص النتائج الموضحة في الأشكال و الجداول المبينة في البحث، يمكن تسجيل الاستنتاجات التالية:

1. دلت مجمل الاختبارات التي أجريت على الـ RCC المنتج أن استعمال الحصويات المعاد تدويرها في إنتاج البيتون المرصوص يبدو إيجابياً جداً، حيث أسهم وجود كمية من النواعم ضمن نفايات وأنقاض الهدم في لعب دور المادة المالئة في خليط الـ RCC عند الرص مأكسب البيتون اكتنازاً مثالياً.

2. أعطت مجمل خلطات الـ RCC المحضرة قيم مقاومةٍ مكعبية عاليةٍ نسبياً على الضغط البسيط بعمر 28يوم ($RC_{28}>300Kg/cm^2$) دون أي إضافاتٍ كيميائية وبعيار إسمنت محدد بـ ($250Kg/m^3$) مما يجعل هذا البيتون قابلاً للاستخدام، حيث تنص مواصفات المعهد الأميركي للبيتون الواردة في "ASTM C 39 (2002) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." على أن المقاومة الدنيا على الضغط البسيط المطلوب تحقيقها للبيتون المرصوص بالمداحي هي $250kg/cm^2$ وتصل حتى $600kg/cm^2$ باستخدام الإضافات وعيارات إسمنت عالية.

3. أثبتت طريقة (الرج، الرص) المتتالي فعاليةً كبيرةً في تصنيع عينات البيتون المرصوص مخبرياً مما دفعنا إلى اعتمادها كأسلوب أمثل في التحضير المخبري لعينات الـ RCC.

4. لقد ركّزنا في بحثنا على دراسة بعض خصائص البيتون المرصوص بالمداحي (المقاومة على الضغط البسيط، التشرب، الكتلة الحجميّة)، وبناءً على ماسبق نقترح مزيداً من البحث حول استخدام هذه التقنيّة والتعمّق في الخصائص الاخرى الهامّة للـ RCC كالديمومة مثلاً، نظراً لما تتعرّض له المنشآة المواصلاتية من تقلّبات حراريّة (حلقات متكررّة من الصقيع والتجمّد والذوبان) مايؤكد على ضرورة إيلاء موضوع الديمومة اهتماماً كبيراً.

5. من الأفضل البحث في الجدوى الاقتصاديّة والفنيّة لإدخال بعض الإضافات على تصاميم البيتون المرصوص بالمداحي كالفيلر الكلسي ونفايات معامل الرخام والرماد المتطاير وغيرها من النفايات الطبيعية.

6. تحقق عملية إعادة التدوير لنواتج هدم مختلف المنشآت الهندسية فائدةً كبيرةً، حيث أثبتت التجارب عدم تأثر المقاومة على الضغط البسيط عند استعمال الحصويات المعاد تدويرها في تصنيع خلطات البيتون المرصوص، دون إغفال المكسب الاقتصادي الهام المتمثل في عملية إعادة التدوير (مواد رخيصة التكلفة موجودة بموقع الإنشاء).

المراجع :

1. SHING CHAI NGO ,N. "*High-Strength structural concrete with recycled aggregates*", Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, 2004, 112.

2. DELHEZ ,P. ,WILLEM ,H. ,MICHEL ,F. ,COURARD ,L. "*Use Of Concrete Recycled Aggregates In Roller Compacted Concrete*", University Of Leige, Research unit in building materials, Belgium.

3. OZCAN ,S. "*Bonding Efficiency Of Roller Compacted Concrete With Different Bedding Mixes*", Middle East Technical University, 2008, 111.

4. خيربك، علي. تأثير استخدام الفيلر على مواصفات البيتون ذاتي الارتصاص، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية– سلسلة العلوم الهندسية، جامعة تشرين.

5. The Indiana Local Technical Assistance Program Roller Compacted Concrete Pavement Manual For Local Government Agencies, Indiana LTAP Center, 2011.

6. BARON ,J. ,OLIVIER ,J. P. *Les bétons ,bases et données pour leur formulation* ,Eyrolles ,Paris , 1999 , 522**.**

7. DREUX ,G. ,FESTA J. *Nouveau guide du béton et de ses constituants* ,Eyrolles , Paris , 1998 , 409.