Study of Mechanical Strength Characteristics For Roller Compacted Concrete with Recycled Aggregates

Dr. MAJED ASAAD[*]
Dr. ALI KHEIRBEK[**]
ALI IBRAHIM[***]

(Received 26 / 9 / 2019. Accepted 13 / 1 / 2020)

□ ABSTRACT □

Recycled aggregates have globally proven to be extremely flexible to use in various engineering applications after they have previously been used exclusively for laying foundations in road works, backfilling and soil replacement for improvement, but the accelerated urban development that necessitated consumption of large quantities of aggregates has led specialists to find methods which aimed to take advantage of the huge quantities produced annually from demolition and construction waste and converted them to gravel that will form a reservist to natural ones for being used in various types of structural concrete, such as roller compacted concrete.

This research focuses on producing compacted concrete using different proportions of recycled aggregates, and studying its mechanical strengths (Compressive Strength, Splitting Tensile Strength, Flexural Tensile Strength) to determine how they are affected by the replacement process.

The research found that the use of recycled aggregates in producing of compacted concrete seems very positive. With a 50% replacement rate, achieved relatively higher compressive strength values, noting that the values that were expected to be low, as the splitting tensile strength and flexural tensile Strength, looked very good for this Type of concrete compared with that identical of concrete manufactured with natural aggregates.

Keywords: Roller compacted concrete, Construction and Demolition Waste, Recycled aggregates, Natural aggregates, Compressive Strength, Splitting Tensile Strength, Flexural Tensile Strength.

[*] **Professor, Department Of Transportation and Structural Materials, Department Of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria. E-Mail : majaasaad@gmail.com.**

[**] **Professor, Department Of Construction Engineering And Management, Department Of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. E-Mail : ali.kheirbek66@gmail.com.**

[***] **Postgraduate Student (Doctorate), Department Of Transportation and Structural Materials, Department Of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria. E-Mail: aliibraheem047@gmail.com.**

دراسة خصائص المقاومات الميكانيكية للبيتون المرصوص بالمداحي المصنّع باستخدام الحصويّات المعاد تدويرها

د. ماجد أسعد*

د. علي خيربك**

علي ابراهيم***

(تاريخ الإيداع 26 / 9 / 2019. قُبِل للنشر في 13/ 1 / 2020)

□ ملخّص □

أثبتت الحصويّات المعاد تدويرها عالميّاً مرونةً كبيرة للاستعمال في مختلف التطبيقاتٍ الهندسيّة بعد أن اقتصر استعمالها سابقاً على طبقات التأسيس في الأعمال الطرقية، لكنّ التطّور العمراني المتسارع الذي استوجب استهلاك كميّات كبيرة من الحصويّات دفع المختصيّن إلى إيجاد منهجيّات تهدف للاستفادة من الكميّات الهائلة المنتجة سنويّاً من نفايات الهدم والإنشاء وتحويلها لحصويات تشكّل رديفاً للحصويّات الطبيعية بهدف استعمالها في مختلف أنواع البيتون الإنشائي كالبيتون المرصوص بالمداحي.

يركّز هذا البحث على إنتاج بيتون مرصوص باستعمال نسبٍ مختلفةٍ من الحصويّات المعاد تدويرها، ودراسة مقاوماته الميكانيكيّة (المقاومة على الضغط البسيط، مقاومة الشد بالفلق، مقاومة الشد بالانعطاف) للوقوف على مدى تأثّرها بعمليّة الاستبدال.

توصّل البحث إلى أنّ استخدام الحصويّات المعاد تدويرها في إنتاج البيتون المرصوص يبدو إيجابيّاً جدّاً، حيث حقّقت نسبة الاستبدال 50% قيماً أعلى نسبيّاً للمقاومة على الضغط البسيط مع الإشارة إلى أنّ القيم التي كان يتوقّع أن تكون منخفضةً كالمقاومة على الشد بالانعطاف والشدّ بالفلق بدت جيّدةً جدّاً لهذا النوع من البيتون مقارنةً مع مثيلاتها للبيتون المصنّع باستخدام حصويّاتٍ طبيعيّة.

الكلمات المفتاحية: البيتون المرصوص بالمداحي، نفايات الهدم والإنشاء، الحصويات المعاد تدويرها، الحصويات الطبيعية، المقاومة على الضغط البسيط، مقاومة الشد بالفلق، مقاومة الشد بالانعطاف.

* أستاذ – قسم هندسة النقل ومواد البناء – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق – دمشق – سورية – البريد الالكتروني majaasaad@gmail.com

** أستاذ – قسم هندسة وإدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية – البريد الالكتروني ali.kheirbek66@gmail.com

*** طالب دكتوراه – قسم هندسة النقل ومواد البناء – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق – دمشق – سورية – البريد الإلكتروني aliibraheem047@gmail.com

مقدمة:

تُعرّف عمليّة إعادة التدوير وفقاً للمراجع البريطانيّة، بأنّها عبارة عن عمليّات معالجة لمواد مستعملة مسبقاً من أجل تصنيع منتجٍ جديد، وقد بدأ يروّج لهذه التقنيّة في أوروبا بعد نهاية الحرب العالميّة الثانية وما خلّفته من دمارٍ هائل، حيث بدأت جهود المهندسين والفنّيين بالبحث عن استراتيجيّاتٍ علميّة لمعالجة مخلّفات الهدم بالشكل الأمثل وإعادة استخدامها كحصويات في جميع الأعمال الهندسيّة على اختلاف أهميتها، ممّا سيسهم في تأمين ديمومةٍ أكبر لمصادر الحصويات الطبيعية باعتبارها موارد غير متجددة. ومع التطور العمراني والصناعي الهائل، تسارعت الأبحاث العلميّة بشكلٍ مكثّف للبحث والاستقصاء الدقيق عن خصائص الحصويّات المعاد تدويرها (RA) (Recycled Aggregates) باختلاف مصادرها ومكوّناتها للتحقّق والتثبّت من إمكانية استخدامها في الخلطات البيتونيّة الإنشائيّة كالبيتون المرصوص بالمداحي (RCC) (Roller Compacted Concrete) والذي يعتبر أحد أشكال الرصف البيتونيّ أو الصلب، حيث بدأ استخدامه عالميّاً نتيجة التطوّر التكنولوجي الهائل وتغيّر أساليب الإنشاء فضلاً عن تذبذب أسعار المشتقّات النفطيّة، الأمر الذي شجّع على إيجاد أساليب جديدة لاستعمال مواد البناء المتوفّرة محليّاً في إنتاج رصفٍ طرقي من البيتون المرصوص بما يتوافق مع الاشتراطات والمواصفات العالمية. وقد فنّدت تلك الأبحاث المتلاحقة فيما بعد تأثير استعمال الحصويّات المعاد تدويرها على خصائص مختلف أنواع البيتون الإنشائيّ، وحاولت التوصّل إلى أقصى نسب الاستبدال التي تضمن الحصول على منتجٍ متوافقٍ مع الكودات والاشتراطات العالميّة، ممّا دفعنا للقيام بهذا البحث الذي سندرس من خلاله تأثير استبدال الحصويّات الطبيعيّة (NA) (Natural Aggregates) بنسبٍ من الحصويات المعاد تدويرها على خصائص المقاومة للبيتون المرصوص المصنّع.

نعرض فيما يلي لمحةً عن البيتون المرصوص بالمداحي (RCC) وخصائص مقاوماته (الضغط البسيط، الشدّ بالفلق، الشدّ بالانعطاف).

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

اتفق عالمياً على تسميةٍ اصطلاحيةٍ شبه موحدةٍ لتقنية البيتون المرصوص بالمداحي:

- **التسمية الأمريكية:** (Roller Compacted Concrete) (RCC) [1].
- **التسمية اليابانية:** (Rolled Compacted Dam - Concrete) (RCD) [2].

إنّ 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 مايميّزه أنّه أكثر جفافاً (تماسكاً) بهبوطٍ معدوم [3]. وقد عرّف المعهد الأميركي للبيتون (ACI) البيتون المرصوص بالمداحي بأنه مزيج صلب (قاس) نسبياً من الحصويات، الماء والمواد الاسمنتية، يرص باستخدام المداحي الاهتزازية [4].

يشير الـ (RCCP) (Roller Compacted Concrete Pavement) إلى الرصف البيتوني الذي يمدّ ويدحى باستعمال معداتٍ ثقيلةٍ، وبأليةٍ مشابهةٍ لتلك التي تتمّ عند استعمال الرصف البيتومينيّ. يعتبر أداء هذا الرصف شبيهاً بأداء الرصف البيتوني من حيث المقاومة والمتانة العالية، فضلاً عن سرعة تنفيذه حيث يمكن فتح الطريق للمرور بزمنٍ أسرع منه في حالة الرصف الصلب البيتوني، كما يعتبر البيتون المرصوص بالمداحي خياراً جيداً في حالاتٍ كـ (الطرق الريفية، الطرق ذات الحمولات المرورية بسرعاتٍ خفيفة، الطرق التي يعتبر من الضروري إعادة فتحها بسرعةٍ كبيرةٍ أمام الحركة المروريّة) [4].

2. خصائص المقاومة للبيتون المرصوص بالمداحي

تعتمد خصائص المقاومة والمرونة لخلطات البيتون المرصوص بالمداحي على خصائص المكونات المستعملة في عمليّة الإنتاج، وكذلك نسب المزج المعتمدة بشكلٍ مشابهٍ للبيتون التقليديّ، وتعتبر درجة الرص ومحتوى الإسمنت في الخليط وجودة الحصويّات من العوامل الأكثر تأثيراً على مقاومة البيتون المرصوص عموماً، مع التأكيد على الأهميّة الكبيرة جدّاً لضبط الجودة في الحقل عبر التقيّد بنسب المزج التصميميّة وخصائص المكونات إضافة لاعتماد المنهجيّة والأسلوب الأمثل في عمليّات المدّ والرص بغية إنتاج بيتون مرصوصٍ بأفضل الخصائص، حسب سلاح المهندسين في الجيش الأمريكيّ (2000) [5].

تؤثّر عمليّة الرصّ بشكلٍ كبير على خصائص البيتون المرصوص، كما تؤدي الاختلافات في المنهجية المتبعة حقليّاً لإنجاز الرص إلى تغيرٍ في خصائصه (ما يفسّر أخذ الجزرات الاختبارية خلال الطور التجريبي في عملية الإنشاء)، حيث يجب أن تتمّ دراسةٌ مخبريّةٌ مفصّلة بغية التحديد الدقيق للطاقة التي ستطبّق على البيتون الطري، لأننا لن نصل إلى المستوى المطلوب للمقاومة إلا في حالة تطبيق الرصّ اللّازم، وكثيراً مايلاحظ انخفاضٌ في مقاومة البيتون المرصوص قرب الوصلات المنفذة نظراً لعدم كفاية الرص وذلك حسب دراسة أنجزت من قبل الباحث SİNAN ÖZCAN في تركيا عام 2008 [6]. تنجز اختبارات مقاومة البيتون المرصوص على عيّناتٍ مخبريّة تجريبيّة أو جزراتٍ تؤخذ من المنشأ نفسه أو من قطّاعاتٍ تجريبيّة تمثّله، كما يعتبر اختيار أليّة الرصّ الأمثل مؤثراً بشكلٍ كبير على نجاح البيتون المرصوص. فعند اختيار نسب مزجٍ مثلى، يجب أن يؤدّي تطبيق الرصّ بشكلٍ فعّال إلى إنتاج بيتون بمحتوً من الفراغات الهوائيّة لايتجاوز 1,5%، حيث سيسبّب وجود محتوً من الفراغات الهوائيّة (5%) مثلاً (بسبب عدم كفاية الرصّ) إلى نقصان قيم المقاومة بحدود الـ 30% [5].

2-1. المقاومة على الضغط البسيط (Compressive Strength)

تعتبر المقاومة على الضغط البسيط مقياساً لمقاومة البيتون المرصوص الإجماليّة بشكلٍ مشابهٍ البيتون التقليديّ، كما تقدّم مؤشّراتٍ عن خصائص أخرى هامّة كالديمومة. تجري قياساتٌ متعدّدة للمقاومة على الضغط البسيط (Compressive Strength) بالتزامن مع عمليّات الإنشاء بهدف مراقبة خصائص المزيج البيتوني والتّحقّق من جودة التنفيذ بمايتوافق مع المتطلّبات التصميميّة. تتأثّر قيم المقاومة على الضغط البسيط بشكلٍ رئيسيّ بعوامل متعدّدة: محتوى الماء، محتوى وخصائص المواد الإسمنتية، درجة الرصّ، تدرج وجودة الحصويّات المستعملة [5].

اعتبر Andriolo أنّه من الصعب جداً التوقع الدقيق للمقاومة على الضغط البسيط بسبب اعتمادها على عوامل كثيرة ومتعددة، فقام بعدّة دراساتٍ تجريبيةٍ حتى توصّل إلى علاقةٍ بسيطةٍ تربط بين قيمة المقاومة ومحتوى المواد الاسمنتية ليحصل على مايسمّى بمعامل فعاليّة المزيج [6].

$$\eta = \frac{\text{Compressive Strength in kgf/cm}^2}{\text{Cementitious Materials in kg/m}^3}$$ [6].

إنّ فعاليّة الخليط في العمر اللّاحق للبيتون غالباً ماتكون أعلى بالنسبة للبيتون المرصوص إذا ماقورن بالبيتون التقليديّ، وهذا مايعني أنّه من الممكن الحصول على المقاومة المطلوبة والمرغوبة للبيتون المرصوص (RCC) باستعمال محتوً أخفض من المواد الإسمنتيّة. من أجل خلطات البيتون المرصوص بالمداحي (التي لم ترصّ بشكلٍ فعّال أو التي لم تُنتج بحجمٍ كافٍ من الملاط الرابط لملء كافّة الفراغات)، فإنّ درجة الرصّ ستتحكّم بقيم مقاومة المنتج البيتونيّ.

وعندما ينتج هذا النوع الخاصّ من البيتون باستعمال حصويّاتٍ بجودةٍ عالية فإنّ مقاومته على الضغط البسيط ستكون قريبةً من تلك للبيتون التقليديّ، أمّا عند إنتاجه باستعمال حصويّاتٍ ذات جودةٍ منخفضةٍ فسيترتّب على ذلك تفاوت قيم المقاومة ضمن مجالٍ أوسع إذا ماقورن مع البيتون التقليديّ [6]. لقد استعملت عديد المشاريع التي نفّذت باستعمال البيتون المرصوص مقاوماتٍ على الضغط البسيط تراوحت بين MPa(20.7 - 13.8) من عمر 90day وحتى عامٍ كامل [5].

2-2. مقاومة الشدّ (Tensile strength)

تعتمد قيم مقاومة الشدّ لخلطات البيتون المرصوص بشكلٍ رئيسيّ على:

محتوى المواد الإسمنتيّة، مقاومة الحصويّات وطبيعة ارتباطها بالملاط الرابط، درجة رصّ المزيج، شروط تنفيذ سطح الرصف ومعالجته في مناطق الوصلات. يعتبر تأثّر مقاومة البيتون المرصوص بالمداحي على الشدّ بخصائص الحصويات وطبيعة ارتباطها بالملاط الإسمنتيّ أكبر من تأثر مقاومته على الضغط البسيط بذلك، وبالتالي فإنّ العلاقة التي تربط بين قيم مقاومة الشدّ ومقاومته على الضغط البسيط لاتختلف باختلاف أليّة الاختبار فحسب، وإنمّا يلعب نوع الحصويّات المستخدمة وقطرها الأعظميّ دوراً كبيراً في ذلك [5].

- **مقاومة الشدّ المباشر (Direct tensile strength)**

تعتبر أليّة إجراء اختبار الشدّ المباشر للبيتون المرصوص مشابهةً للبيتون التقليديّ، وهي أقلّ من قيم مقاومة الشدّ بالفلق (غالباً ماتكون أقلّ بنسبة %(30-25))، لذلك فهي تمثّل خصائص الشدّ الأصغريّة للبيتون. تراوحت نسبة مقاومة الشدّ المباشر إلى المقاومة على الضغط البسيط باستعمال الجزرات الاختباريّة والأسطوانات التجريبيّة لعددٍ من مشاريع البيتون المرصوص بين %(9-3)، علماً بأنّ معظمها قد تراوح بين %(8-6) تبعاً لمستوى المقاومة وعمر الاختبار [5].

- **مقاومة الشدّ بالفلق (Splitting Tensile Strength)**

يؤمّن إجراء اختبار مقاومة الشدّ بالفلق نتائجاً بموثوقيّةٍ وتجانسٍ أكبر من اختبارات الشدّ المباشر، وتسمح هذه النتائج بتوقّع مقاومة الشد الحقيقيّة للبيتون المرصوص. تختلف نسبة مقاومة البيتون المرصوص على الشدّ بالفلق إلى مقاومته على الضغط البسيط تبعاً لـ (نوع الحصويّات، مستوى المقاومة، عمر الاختبار) [5].

تعطى قيم تقريبيّة لمقاومة الشدّ بالفلق اعتماداً على قيم القاومة المميزة ($f`_c$) للبيتون المحضّر [5]:

1. $f`_c < 24.1MPa$: (تتراوح قيم مقاومة الشد بالفلق بين $0.08*f`_c$ و $0.17*f`_c$)
2. $f`_c > 24.1MPa$: (تتراوح قيم مقاومة الشد بالفلق بين $f_{st} = 0.4565\sqrt{f`c}$ و $f_{st} = 0.7055\sqrt{f`c}$

مثال: بفرض أنّ $f`_c$ لبيتون مرصوص كانت 30MPa فإنّ مقاومته على الشد بالفلق تتراوح بين MPa(3.86~2.5) تقريباً.

- **مقاومة الشدّ بالانعطاف (Flexural Tensile Strength)**

تعتمد مقاومة الشدّ بالانعطاف للبيتون المرصوص عند استعماله في أعمال الرصف الطرقي على تمام عمليّة الرصّ في أسفل المقطع المرصوف. تعتبر أماكن الوصلات بين الخطوط المدحيّة (المتجاورة) نقاط ضعفٍ وغالباً ماتتأثر سريعاً بحدوث التشّوهات جرّاء فعل (التجمد، الذوبان) مالم تُنجز عمليّة الرصّ بشكلٍ مثاليّ [7]. تتراوح قيم المقاومة على الشد بالانعطاف عموماً للبيتون المرصوص بالمداحي بين MPa(6.9 - 3.4) [8].

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث بشكلٍ رئيسيّ إلى وضع منهجيّة سليمة لتصميم خلطاتٍ من البيتون المرصوص ودراسة تأثير استبدال نسب من الحصويّات الطبيعيّة بأخرى معاد تدويرها على خصائص المقاومات الميكانيكية (المقاومة على الضغط

البسيط، مقاومة الشد بالفلق، مقاومة الشد بالانعطاف) للبيتون المرصوص بالمداحي المصنّع، وتمّ ذلك عبر تحديد قيم مقاوماته بعمر 28day وفق نسب الاستبدال المعتمدة %(0, 50, 70, 100) ولحظ التغيّرات الحاصلة للوصول إلى نسب الاستبدال المسموحة، والتي تؤدّي إلى منتجٍ يحقّق الخصائص الفنية الملائمة.

بينما تكمن أهميّة البحث في التثبّت من مدى جودة وكفاءة الحصويّات المعاد تدويرها للاستعمال في إنتاج البيتون المرصوص كرديفٍ أو بديلٍ للحصويّات الطبيعيّة، ممّا سيسهم في فتح آفاقٍ جديدةٍ للاستفادة منها وبالتالي تأمين ديمومةٍ أطول للمصادر الطبيعيّة الحصويّات غير المتجددة.

طرائق البحث ومواده:

تم اعتماد المنهجية التجريبية في إجراء البحث من خلال اعتماد نسب استبدالٍ مختلفةٍ للحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها ودراسة خصائص المقاومة (المقاومة على الضغط البسيط، مقاومة الشد بالفلق، مقاومة الشد بالانعطاف) بعمر 28day للبيتون المرصوص المنتج من أجل كل نسبةٍ.

تمّ إحضار مخلّفات وأنقاض الهدم من موقعٍ لبناءٍ مهدومٍ في مدينة اللاذقية، مشتملةً على كتلٍ متفاوتة الحجم من (بلاط منزلي، سيراميك، بلوك، بيتون) وذلك لمعالجتها مخبرياً عبر سلسلةٍ من مراحل التكسير (الطحن) والفرز بغية توصيفها وإعادة استخدامها في إنتاج عيّنات مخبريّةٍ من البيتون المرصوص، بينما تم إحضار الحصويات الطبيعية (بحص طبيعي، رمل ناعم، رمل خشن) والإسمنت من أحد المراكز المخصصة لبيع مواد البناء في مدينة اللاذقية.

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

- **المرحلة الأولى:** إحضار الكمّية المطلوبة من الأنقاض من موقع البناء المهدوم (الرمل الشمالي) في مدينة اللاذقية مع إجراء فرزٍ أولي يدويّ في الموقع.
- **المرحلة الثانية:** تضمنّت عمليّة المعالجة الأولية التكسير اليدوي للإحضارات باستخدام مطرقةٍ لتحويلها إلى حجومٍ وكتلٍ أصغر تسمح بمتابعة منهجيّة المعالجة عبر استخدام الكسارة الآليّة الموجودة في مخبر ميكانيك التربة في كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين، ليكون القطر الأعظمي النهائي للحصويات المنتجة بحدود (Dmax=19mm).
- **المرحلة الثالثة:** توصيف الحصويات المعاد تدويرها والحصويات الطبيعية عبر إجراء التجارب المخبريّة اللازمة.
- **المرحلة الرابعة:** اعتماد الصميم الأمثل لمزيج البيتون المرصوص اعتماداً على:
  - ❖ الطريقة الفرنسيّة (Dreux-Gorisse).
  - ❖ اختبار بروكتور المعدّل.
- **المرحلة الخامسة:** إنتاج عينات البيتون المرصوص وفق نسب الاستبدال المختلفة ودراسة مختلف خصائص المقاومة بعمر 28day وتحليل النتائج التي تمّ التوصّل لها.

1. مواصفات المواد الداخلة في خلطات البيتون المرصوص بالمداحي

أما المواد المستخدمة لإنجاز البحث التجريبي فكانت:

a) **بحص طبيعي (حسياء)** : LA =19,18% (معامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس).

b) **أنقاض ونفايات الهدم** : اشتملت على كتل بيتونية إضافة إلى بقايا البلوك والسيراميك والبلاط المنزلي.

c) **رمل خشن من مصادر محليّة** : Dmax = 5mm، معامل نعومته 3,6، ومكافئه الرملي 84.8%، ووزن حجمي صلب ρ_s=2,7 g/cm^3.

d) **رمل ناعم من مصادر محليّة** : Dmax = 1mm، معامل نعومته 1,63، ومكافئه الرملي 70,1%، ووزن حجمي صلب ρ_s=2,525 g/cm^3.

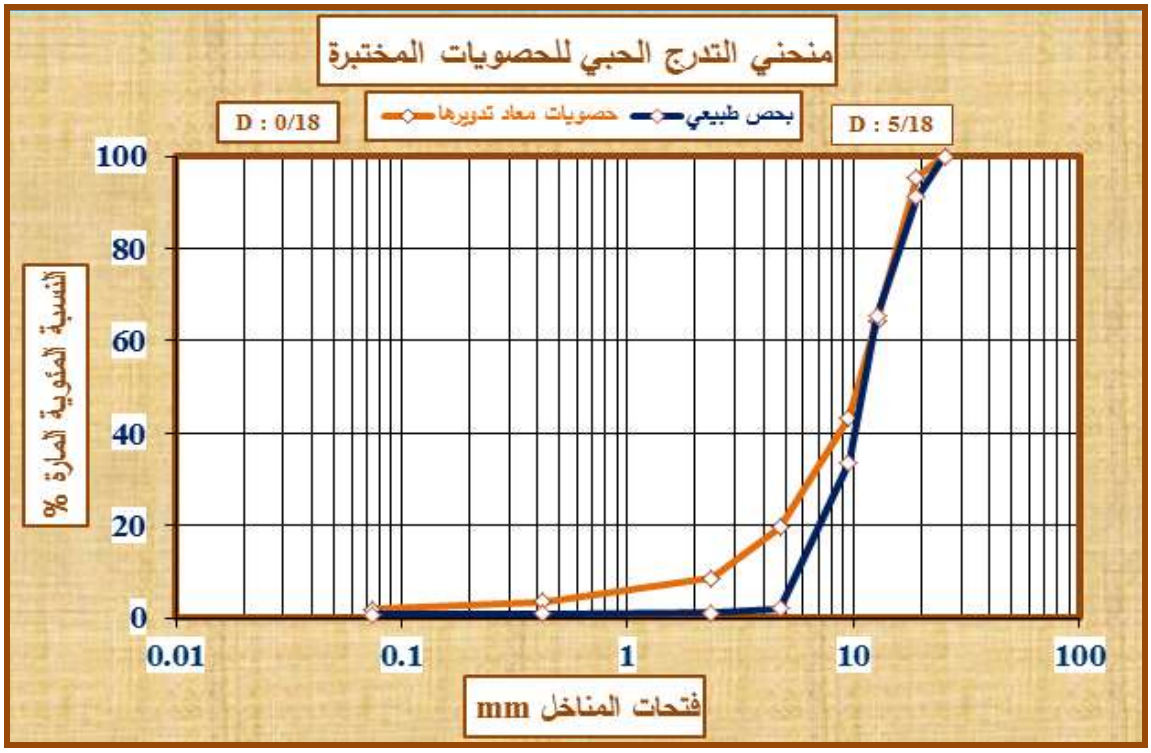
e) **إسمنت بورتلاندي عادي أسود تصنيف I :** إنتاج معمل إسمنت طرطوس بصنف 32,5.

f) **ماء للجبل** : قابل للاستعمال ويحقق الشروط المطلوبة.

1-1. توصيف الإحضارات

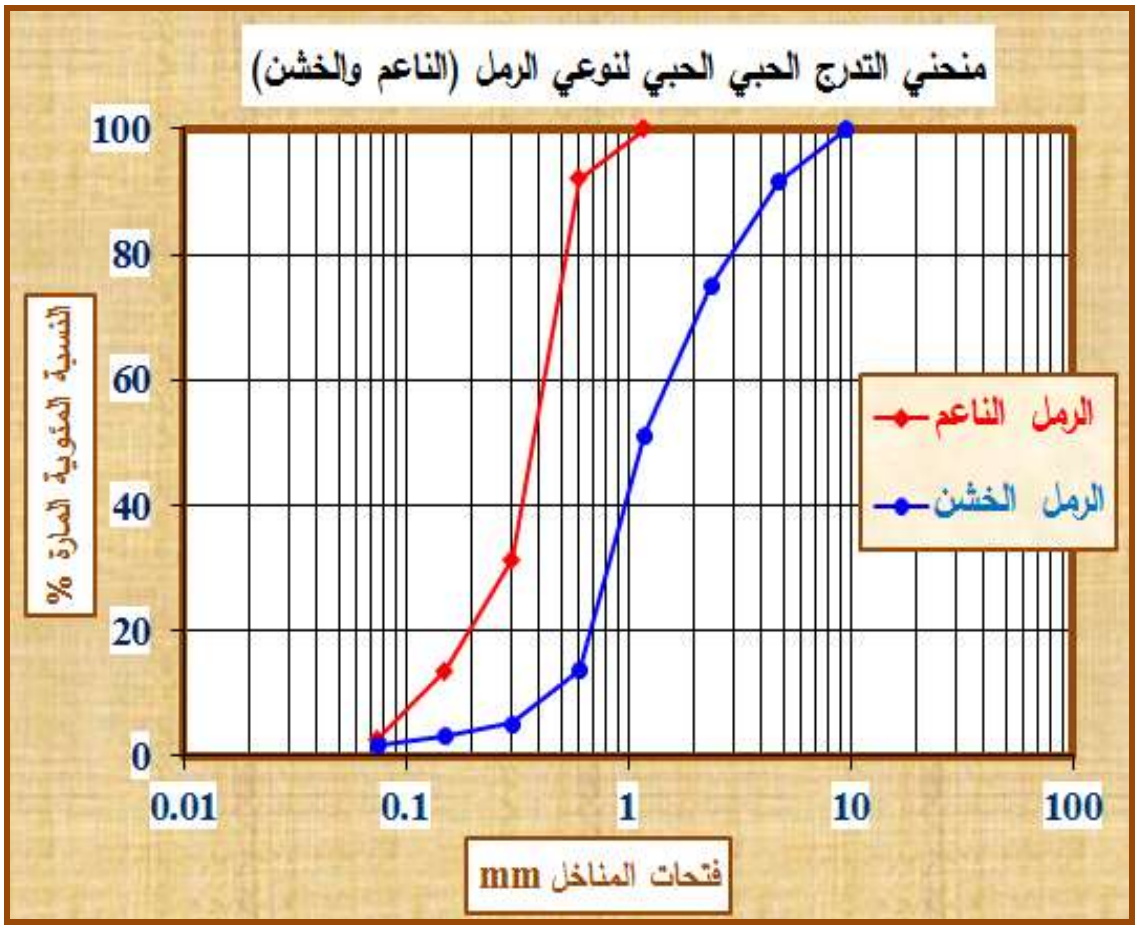
أجريت مجموعة من التجارب المخبريّة للوصول إلى التوصيف الدقيق للحصويات الطبيعية والحصويات المعاد تدويرها، وقد كانت هذه التجارب: (التحليل الحبي، الكتلة الحجمية الظاهريّة والكتلة الحجميّة الصلبة، معامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس، المكافئ الرملي، التشرب).

يبين الشكل (1) منحنيات التدرج الحبي للحصويات الطبيعية والحصويّات المعاد تدويرها التي تمّ مزجها وفق النسب الآتية: (60% بيتون، 20% بلوك، 20% سيراميك) بما ينسجم مع نسب مختلف مكونات ركام الهدم عالميّاً. يبدو منحنيا التدرج لكل من الحصويات الطبيعية (RA) والحصويات المعاد تدويرها (NA) متقاربين نسبيّاً مما سيخفّف من تأثير بارامتر التدرج الحبي على مواصفات البيتون المرصوص المنتج.



الشكل (1): منحني التدرج الحبي الخاص بالحصويات المختبرة

أما منحنيات التدرج الحبي لنوعي الرمل المستخدمين في إنتاج البيتون المرصوص فهي موضحة في الشكل (2):



الشكل (2): منحنيات التدرج الحبي الخاصّة بنوعي الرمل (الناعم والخشن)

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

الجدول (1): الكتلة الحجمية الظاهرية والصلبة للحصويات المختبرة

العينة	الكتلة الحجمية الظاهرية t/m^3 أو kg/l	الكتلة الحجمية الصلبة t/m^3 أو kg/l
نواتج هدم البيتون	1.321	2.504
نواتج هدم السراميك	1.186	2.346
نواتج هدم البلوك	1.176	2.327
مزيج نواتج الهدم	1.267	2.447
الرمل الناعم	1.389	2.525
الرمل الخشن	1.534	2.7
البحص الطبيعي	1.544	2.775

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

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

العينة	عامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس %	درجة التشرب %
نواتج هدم البيتون	31.9	4.3
نواتج هدم السراميك	38.66	6.4
نواتج هدم البلوك	68.34	8.2
مزيج نواتج الهدم	35.46	4.8
البحص الطبيعي	19.18	0.8

أما قيم المكافئ الرملي فكانت 70,1% للرمل الناعم و84,8% للرمل الخشن و98,1% بالنسبة للمواد الناعمة المعاد تدويرها، تُقبَل هذه القيم للاستعمال في إنتاج البيتون المرصوص بالمداحي.

2. تصميم خلطات البيتون المرصوص بالمداحي [9, 10].

- تم اعتماد الطريقة الفرنسيّة (Dreux-Gorisse) في تصميم الهيكل الحصوي لخلطات البيتون المرصوص بالمداحي، وقد تمّ التصميم على مرحلتين:
  - ❖ تصميم العجينة الرابطة (قانون بولومي)
  - ❖ تصميم الخلطة الحصوية

حُدّدت نسب مختلف مكونات الخليط اعتماداً على (Dreux-Gorisse)، مع التأكيد على أنّ كمية الماء (W) قد حدّدت بشكلٍ دقيق بعد إجراء اختبار بروكتور المعدّل، حيث تمّ اعتماد القيمة الوسطيّة بين (W) النظريّة (بولومي) و(W) التجريبيّة (بروكتور) ومايتوافق معها من محتوٍ للماء في $1m^3$ من البيتون المرصوص، وذلك بسبب الدور الحاسم الذي تلعبه نسبة الماء المضافة في نجاح تصميم وتنفيذ هذا النوع الخاص من البيتون نظراً لارتباطها الوثيق بدرجة الرصّ وقيم الكثافة الناتجة.

- اعتُمِدَت 4 خلطات للبيتون المرصوص بالمداحي بنسب استبدال مختلفة للحصويات الطبيعية (NA) بالحصويات المعاد تدويرها (RA) وفق نسب المزج المعتمدة.

تمّ الاستبدال وفق النسب: %(0, 50, 70, 100)، بحيث يشير الرمز CN إلى بيتون استخدمت فيه الحصويّات الطبيعية بنسبة 100% والرمز CR50 إلى بيتون استخدمت فيه الحصويّات المعاد تدويرها بنسبة 50%، وهكذا لباقي نسب الاستبدال.

- تم تثبيت محتوى الإسمنت في كل الخلطات ($250Kg/m^3$) (وهي قيمة اقتصاديّة تتلاءم مع البيتون المرصوص)، حجم الهواء $20L/m^3$، المقاومة التصميميّة $200\,kg/cm^2$.
- تم استخدام نوعين من الرمل لإنجاز الدراسة التجريبية (رمل ناعم، رمل خشن)، قمنا بإيجاد نسب المزج المثلى بحيث تحقّق معامل نعومة لمزيج الرمل بحدود 2.77 (تعتبر هذه القيمة مثاليّةً للرمل المستخدم في إنتاج الخلطات البيتونيّة).

وقد كانت نسب المزج وفق مايلي: **58% رمل خشن، رمل ناعم 42%.**

يبيّن الجدول (3) التصميم النهائيّ للهيكل الحصويّ لعيّنات البيتون المرصوص اعتماداً على (Dreux-Gorisse):

الجدول (3): تصميم الخلطة الحصويّة لعيّنات البيتون المرصوص

الخلطة	نسبة البحص %	نسبة الرمل الناعم %	نسبة الرمل الخشن %
CN	59	17.2	23.8
CR50	65	14.7	20.3
CR70	69	13	18
CR100	69	13	18

يبين الجدول (4) الأوزان اللازمة بالـ kg لصناعة $1m^3$ من البيتون المرصوص اعتماداً على نسب المزج التصميميّة (الطريقة الفرنسيّة) وذلك قبل تعديل نسبة الماء من اختبار بروكتور المعدّل، علماً أنّ نسبة الماء هي وزن الماء في الخلطة التصميمية مقسوماً على وزن المكونات الصلبة:

الجدول (4): أوزان المكونات اللازمة لصناعة $1m^3$ من البيتون اعتماداً على Dreux-Gorisse

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 (kg/m^3)	نسبة الماء (%)
CN	1275	-	339	500	250	120	5.08
CR50	712	628	293	433	250	110	4.75
CR70	459	945	263	388	250	100	4.34
CR100	-	1350	263	388	250	100	4.44

وبعد إجراء اختبار بروكتور المعدّل، كانت نسب الماء الأمثل التي توافقت مع قيم الكتلة الحجمية الأعظميّة:

الخلطة CN **(7%)**، الخلطة CR50 **(7.6%)**، الخلطة CR70 **(7.6%)**، الخلطة CR100 **(8.4%)**

ثمّ عدّل التصميم بحيث تكون نسبة الماء المعتمدة هي القيمة الوسطية بين الطريقة الفرنسية (Dreux-Gorisse) واختبار بروكتور المعدّل وفق الجدول (5):

الجدول (5): التصميم النهائي لخلطات البيتون المرصوص المعتمدة

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 (kg/m^3)
CN	1239	-	329	486	250	143
CR50	682	601	281	415	250	143
CR70	438	900	250	370	250	137
CR100	-	1275	248	366	250	144

3. إنتاج عيّنات البيتون المرصوص بالمداحي مخبريّاً

اعتُمِدَت منهجيّة الخلط الآلي لمكوّنات البيتون المرصوص في الخلّاط الآليّ، حيث قمنا بإضافة الأوزان التصميميّة بعد أن تمّ تجفيفها في الفرن لمدة يومٍ كاملٍ بدرجة 105 درجة مئوية. تلخصت منهجيّة صنع العيّنات مخبريّاً (مكعبات، أسطوانات، مواشير) بإضافة الوزن الأعظمي الذي يتلقاه القالب على طبقاتٍ (سمك الطبقة الواحدة منها 50mm تقريباً) [11]، بحيث تتلقى كل طبقة (50 ضربة) بواسطة قضيب فولاذي (ϕ25mm) وذلك بالتزامن مع وضع القالب على الطاولة الرجّاجة التي تساعد على إملاء القالب بشكلٍ كامل للوصول إلى الكثافة التصميميّة. تمّ تحديد الوزن الأعظميّ الذي سيضاف للقالب بناءً على اختبار بروكتور المعدّل (حجم القالب*الكتلة الحجميّة الأعظميّة)، حيث شكّل هذ المعيار الأساسيّ لضمان الوصول إلى إنتاج بيتونٍ مرصوص بخصائص مناسبة، نظراً لارتباط جودته بشكلٍ كبير ببارامترين رئيسيّن هما (درجة الرصّ والكتلة الحجميّة).

يبيّن الشكل (3) نماذجاً لعيّنات البيتون المرصوص المصنّع اعتماداً على المنهجيّة المتّبعة في عمليّة الإنتاج:

الشكل (3): نماذج من البيتون المرصوص المصنّع (مواشير، أسطوانات، مكعبات)

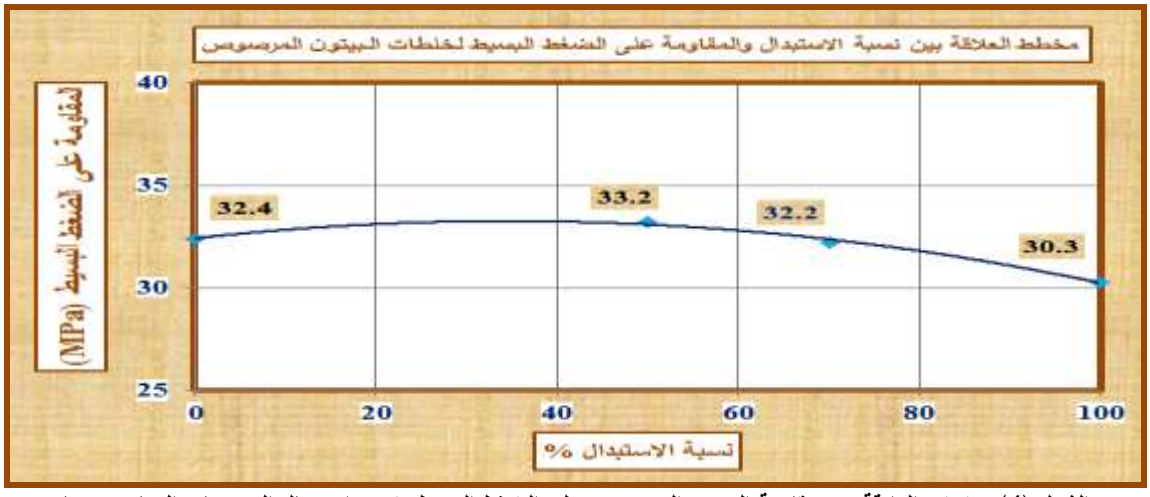
النتائج والمناقشة:

أنجز اختبار المقاومة على الضغط البسيط بعمر 28day على عيّنات مكعبيّة cm(15*15*15)، كما أنجز اختبار مقاومة الشدّ بالفلق بعمر 28day على عيّنات أسطوانيّة من البيتون المرصوص cm(d:15 * h:30)، بينما أجري اختبار مقاومة الشدّ بالانعطاف (Flexural Tensile Strength) على مواشير بأبعاد cm(10*10*50). علماً أنّ كلّ قيمةٍ (مقاسة) في المخطّطات هي متوسّط لخمس عيّنات مدروسة.

1- نتائج دراسة تأثير استبدال الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها (RA) على مقاومة البيتون المرصوص على الضغط البسيط

لقد حقّقت مجمل خلطات البيتون المرصوص المحضرة قيم مقاوماتٍ مكعبيّة على الضغط البسيط بعمر 28day تجاوزت الـ $300kg/cm^2$، حيث لم تسبّب عمليّة الاستبدال أيّ تأثيرٍ سلبي ملحوظ على قيم المقاومة حتى نسبة الاستبدال 70%، بل حقّقت الخلطة (CR50) زيادةً طفيفة في قيم المقاومة بلغت 2.47% مقارنةً مع بيتون الحصويّات الطبيعية الصرفة (CN). وفي أقصى حالات الاستبدال (100%) لم تتجاوز نسبة نقصان المقاومة

6.48% مقارنةً مع الخلطة (CN) ممّا يقدّم مؤشراً إيجابيّاً جدّاً على جدوى اعتماد البيتون المرصوص بالمداحي كتطبيقٍ ناجحٍ جدّاً لاستعمال الحصويات المعاد تدويرها بسبب احتوائها على كميّةٍ من النواعم التي تنتج من عمليّات الطحن والمعالجة (قاربت الـ 2%)، هذه المواد التي تلعب دور المادة المالئة عند رصّ البيتون مايقود إلى إنتاج بيتونٍ باكتنازٍ مثالي وخصائص ممتازة. يبين الشكل (4) مخطط العلاقة بين المقاومة على الضغط البسيط لخلطات البيتون المرصوص بالمداحي ونسب استعمال الحصويّات المعاد تدويرها:



الشكل (4): منحني العلاقة بين مقاومة البيتون المرصوص على الضغط البسيط ونسب استعمال الحصويات المعاد تدويرها

2- نتائج دراسة تأثير استبدال الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها (RA) على مقاومة البيتون المرصوص على الشد بالانعطاف

استمرّت الحصويّات المعاد تدويرها بتقديم أداءٍ ممتازٍ عند اختبار البيتون المرصوص المصنّع على الشدّ بالانعطاف، فقد لوحظ ارتفاع قيمة المقاومة بعمر 28day من 6.61MPa للخلطة (CN) إلى 6.79MPa للخلطة (CR50) بنسبة زيادة بلغت 2.72%. ومع تزايد استعمال الحصويات المعاد تدويرها في خلطات البيتون المرصوص المعتمدة، كان انخفاض قيم المقاومة على الشدّ بالانعطاف بعمر 28day محدوداً جدّاً لخلطتي (CR70) و(CR100) وقد بلغت 1.97% و6.05% على الترتيب مقارنةً مع البيتون الطبيعيّ (CN) الأمر الذي يعتبر مؤشراً إيجابيّاً آخر على قابليّة الحصويّات المعاد تدويرها للاستعمال بنسبٍ كبيرةٍ في إنتاج هذا النوع المميز والخاصّ من البيتون. يبين الشكل (5) مخطط العلاقة بين مقاومة البيتون المرصوص المصنّع على الشد بالانعطاف (Flexural Tensile Strength) ونسب استبدال الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها:

الشكل (5): منحني العلاقة بين نسب استعمال الحصويات المعاد تدويرها ومقاومة البيتون المرصوص على الشد بالانعطاف

3- نتائج دراسة تأثير استبدال الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها (RA) على مقاومة البيتون المرصوص على الشد بالفلق

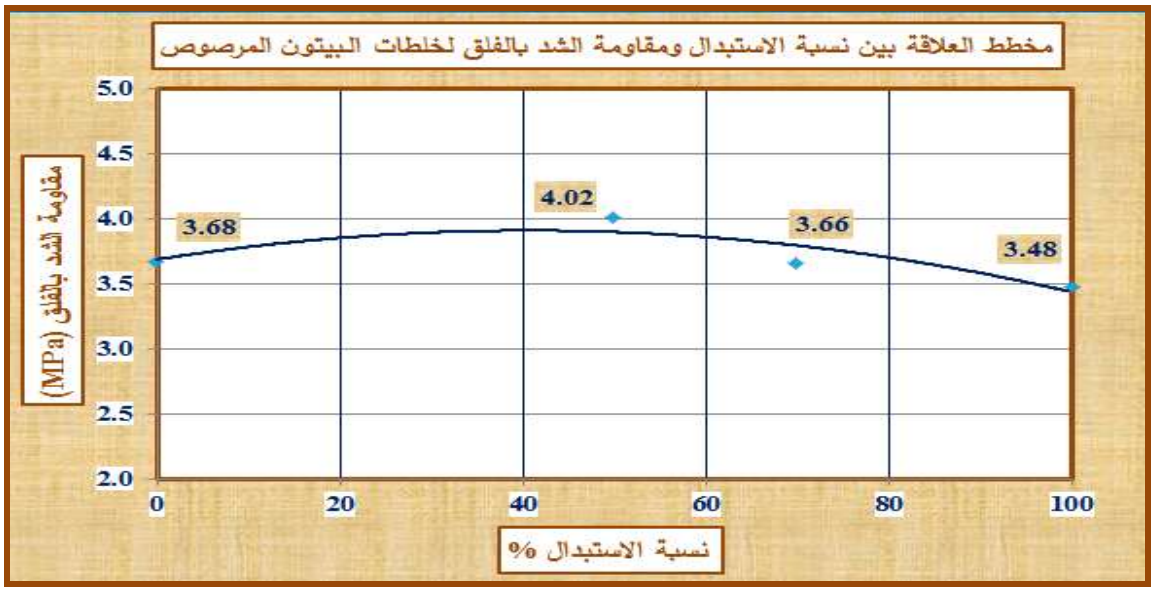
لقد كانت قيم مقاومة الشد بالفلق (Splitting Tensile Strength) لخلطات البيتون المرصوص منسجمةً مع قيم المقاومة على الضغط البسيط وقيم مقاومة الشدّ بالانعطاف مع ملاحظة تحسّن قيم مقاومة الشدّ بالفلق عند استعمال الحصويّات المعاد تدويرها بنسبة 50%، فقد ارتفعت قيمة المقاومة بعمر 28day من 3.68MPa للخلطة (CN) إلى 4.02MPa للخلطة (CR50) (بنسبة زيادة بلغت 9.2%). حقّقت الخلطة (CR70) قيمةً للمقاومة على الشد بالفلق مماثلةً تقريباً للخلطة (CN)، بينما انخفضت مقاومة البيتون في أقصى نسب الاستبدال (100%) بنسبةٍ بلغت 5.4% مقارنة مع بيتون الحصويّات الطبيعيّة الصرفة.

لقد كانت نسب مقاومة الشدّ بالفلق إلى المقاومة على الضغط البسيط لخلطات البيتون المرصوص المصنّع كمايلي:

الخلطة CN **(11.35%)**، الخلطة CR50 **(12.1%)**، الخلطة CR70 **(11.38%)**، الخلطة CR100 **(11.48%)**

ويبدو من الواضح عدم تأثر هذه النسبة بين مقاومة البيتون على الشد بالفلق (Splitting Tensile Strength) ومقاومته على الضغط البسيط حتى عند إنتاجه باستعمال الحصويات المعاد تدويرها (RA) فقط.

يبين الشكل (6) مخطط العلاقة بين المقاومة على الشد بالفلق لخلطات البيتون المرصوص المصنّع ونسب استبدال الحصويات الطبيعية بتلك المعاد تدويرها:



الشكل (6): منحني العلاقة بين مقاومة البيتون المرصوص على الشد بالفلق ونسب استعمال الحصويات المعاد تدويرها

الاستنتاجات والتوصيات:

بعد استخلاص النتائج الموضّحة في الأشكال والجداول المبينة في البحث، يمكن تسجيل الاستنتاجات التالية:

1. لم تؤثّر عمليّة استبدال الحصويّات الطبيعيّة بالحصويّات المعاد تدويرها على جودة الخصائص الميكانيكيّة للبيتون المرصوص المصنّع، فقد حقّق استعمال حصويات نفايات الهدم بنسبة 50% قيماً أعلى نسبيّاً لمختلف أنواع المقاومات مقارنةً مع بيتون الحصويات الطبيعية (CN)، وقد بلغت نسب الزيادة:

(المقاومة على الضغط البسيط (2.47%)، مقاومة الشد بالفلق (9.2%)، مقاومة الشد بالانعطاف(2.72%))

كما يعتبر من الإيجابيّ جدّاً أنّه وفي أقصى نسب الاستبدال من الحصويّات المعاد تدويرها (100%)، لم يتسبّب ذلك بحدوث تأثيرٍ سلبي كبير على قيم المقاومات الميكانيكيّة بل انخفضت بشكلٍ بسيطٍ نسبيّاً لم يتجاوز في حده الأعظمي 6.48% وكان ذلك بالنسبة لقيم المقاومة على الضغط البسيط. ويبدو ذلك خلافاً للبيتون التقليديّ، حيث غالباً ما تنخفض مقاوماته الميكانيكية بشكلٍ ملحوظٍ مع زيادة نسب الاستبدال من الحصويّات المعاد تدويرها حسب ما سجّلته الدراسات العالميّة المعنيّة بهذا الشأن [12]. لكنّ محتوى النواعم في حصويّات أنقاض الهدم إضافةً لأجزاء الملاط المرتبطة بالجزيئة الحصوية والتي تنسحق تحت تأثير الرص المطبّق، تسهم مجتمعةً في إنتاج بيتونٍ مرصوص باكتنازٍ عالٍ وخصائص ميكانيكيّة جيّدة.

2. توصّل البحث إلى إمكانيّة تصنيع بيتونٍ مرصوص وفق الخلطات التصميميّة ونسب الاستبدال بمقاوماتٍ مكعبيّة على الضغط البسيط لم تقل بعمر 28day عن $300kg/cm^2$ وذلك حتى في أقصى نسب الاستبدال (100%) رغم عيار الإسمنت المنخفض نسبيّاً ($250kg/m^3$)، أي أنّ البيتون المنتج يقع تصنيفه ضمن (C25) وفق مواصفات الكود العربي السوري، الأمر الذي يعتبر إيجابياً جدّاً لأنّ العيار المفترض وفق اشتراطات الكود للوصول إلى بيتونٍ بمقاوماتٍ أسطوانيّة مميزة (25MPa) بعمر 28day هو ($400kg/m^3$) في حالة الخرسانة المراقبة، ممّا يدلّ على نجاح المنهجيّة المتّبعة في تصنيع عيّنات البيتون المرصوص للوصول إلى منتجٍ بيتوني بأفضل الخصائص الممكنة.

3. كانت نتائج اختبار مقاومة البيتون على الشد بالفلق والشدّ بالانعطاف إيجابيّة جدّاً ومنسجمةً مع نتائج اختبار المقاومة على الضغط البسيط (Compressive Strength) ولم تتأثّر بزيادة نسب الحصويات المعاد تدويرها، بسبب احتواء هذه الحصويات على كميّة من المواد الناعمة المارّة من المنخل N_{200} (حوالي 1,8% في بحثنا) والتي تلعب دور المادة المالئة عند إنجاز عمليّة الرص ممّا يؤدّي إلى إنتاج بيتونٍ باكتنازٍ مثاليّ وتشابكٍ عالٍ بين حصويّاته، الأمر الذي يعوّض انخفاض جودة الحصويّات المعاد تدويرها من وجهة النظر الميكانيكيّة والفيزيائيّة إذا ماقورنت بالحصويّات الطبيعية (عامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس أعلى، تشرّب أعلى، كتلة حجميّة أقلّ) [12, 13]. كلّ ذلك يدفعنا للقول أنّه من الممكن اعتبار البيتون المرصوص بالمداحي تطبيقاً ناجحاً جدّاً لاستعمال الحصويّات المعاد تدويرها.

4. ركّز بحثنا المنجز على دراسة خصائص المقاومات الميكانيكيّة (المقاومة على الضغط البسيط، المقاومة على الشدّ بالفلق، المقاومة على الشد بالانعطاف) بعمر 28day للبيتون المرصوص المصنّع وفق نسب الاستبدال المعتمدة، كانت النتائج الأوليّة مشجعةً جدّاً لمزيدٍ من البحث والاستقصاء حول الخصائص الأخرى الهامّة كالتشرّب والنفاذيّة وخاصّةً الديمومة (في حالة استعمال الحصويات المعاد تدويرها) باعتبار أن الطرق تعتبر منشآتٍ هندسيّة تتعرّض بشكلٍ مستمر لعديد العوامل المخربة من ظروف مناخيّةٍ قاسيةٍ ومتقلّبة كدورات (تجمد– ذوبان، جفاف– رطوبة) أو مواد كيميائيّة ضارّة قد تتمكّن من الوصول إلى سطح الطريق كأحماضٍ وكبريتات.

References:

1. American Concrete Institute Committee 207, " *Roller-Compacted Mass Concrete ".* ACI 207.5R-99, Farmington Hills, USA, 2011.
2. Japan Commission On Large Dams (JCOLD), " Large Dams 2012 ".
3. 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.
4. The Indiana Local Technical Assistance Program Roller Compacted Concrete Pavement Manual For Local Government Agencies, Indiana LTAP Center, 2010.
5. US Army Corps of Engineers, Engineering and Design, " *Roller-Compacted Concrete* ", 2000.
6. OZCAN ,S. " *Bonding Efficiency Of Roller Compacted Concrete With Different Bedding Mixes* ", Middle East Technical University, Turkey, 2008, 111.
7. ACI Committee 309, "*Compaction of Roller Compacted Concrete*", Committee 309.5R-00, 2000.
8. Concrete Pavement Innovation & Technology Transfer Workshop Composite Pavements, *Roller Compacted Concrete*.
9. BARON,J. ,OLIVIER,J. P. " *Les bétons, bases et données pour leur formulation ",* Eyrolles, Paris, 1999, 522**.**
10. DREUX ,G. ,FESTA J. " *Nouveau guide du béton et de ses constituants ",* Eyrolles, Paris, 1998, 409.
11. The Syrian Arab Code for designing and implementing structures with reinforced concrete.
12. SHING CHAI NGO ,N. " *High-Strength structural concrete with recycled aggregates* ", Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, 2004, 112.
13. MUSCALU, M. ,ANDREI ,R. " *Use Of Recycled Aggregates In Rigid Pavement Construction* ", Unimas E-Journal Of Civil Engineering, Vol 1:Issue 1/ August 2009, Faculty of Civil Engineering and Building Services, Technical University of Iaşi, 2011.