مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (5) العدد(2) 2021
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (5) No. (2) 2021

تأثير حلقات الترطيب والتجفيف على ديمومة البيتون المرصوص بالدحي المصنّع باستخدام الحصويّات المعاد تدويرها

د. ماجد أسعد *

د. علي خيربك **

م. علي ابراهيم ***

(تاريخ الإيداع 18 /10 /2020 . قُبِل للنشر في 9 /3 /2021)

□ ملخّص □

تُعتبَر عمليّة إعادة استخدام نفايات الهدم والإنشاء من القضايا التي شغلت اهتمام المهندسين مؤخراً بسبب التطّور العمرانيّ المتسارع الذي استوجبَ استهلاك كميّاتٍ هائلةٍ من الحصويّات، الأمر الذي تطلّب البحث عن آفاقٍ أوسع لمعالجة هذه النفايات وتحويلها لحصويّاتٍ أثبتّت الأبحاث فيما بعد قابليّتها للاستخدام بنسبٍ مقيّدة في العديد من التطبيقات الهندسيّة كالبيتون المرصوص بالدحي.

تمّ في أبحاثٍ سابقة إنتاج أصناف من البيتون المرصوص باستعمال نسبٍ متدرجةٍ من الحصويّات المعاد تدويرها، وقد أعطَت قيماً للمقاومة على الضغط البسيط بعمر 28days تجاوزت الـ 30MPa حتّى في أقصى نسب الاستبدال بالرغم من عيار الإسمنت المنخفض نسبيّاً ($250kg/m^3$). وانطلاقاً من إيجابيّة النتائج السابقة، تمّت دراسة ديمومة هذا البيتون تحت تأثير حلقات الترطيب والتجفيف باعتبار أنّ البيتون المرصوص يُستعمل في منشآتٍ ستتعرّض لظروفٍ مناخيّةٍ متقلّبة.

درسَ البحثُ تأثير إخضاع عيّنات البيتون لحلقاتٍ متكرّرة من الترطيب والتجفيف (10, 20, 30 cycles) عبر تحديد قيمة الفاقد في الوزن والمقاومة على الضغط البسيط. وقد تم التوصل إلى أنّ تأثّر البيتون بدا محدوداً حيث لم تتجاوز نسبة الفاقد بالوزن والمقاومة (0.124%) و(11.44%) على الترتيب وذلك عند إنتاج البيتون باستعمال الحصويّات المعاد تدويرها فقط ومن أجل 30 حلقة ترطيب وتجفيف.

الكلمات المفتاحية: البيتون المرصوص بالدحي، نفايات الهدم والإنشاء، الحصويات المعاد تدويرها، الديمومة، حلقات الترطيب والتجفيف، الوزن، المقاومة على الضغط البسيط.

* أستاذ في قسم هندسة النقل ومواد البناء – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق – دمشق – سورية .

** أستاذ في قسم هندسة وإدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية .

*** طالب دكتوراه في قسم هندسة النقل ومواد البناء - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق – دمشق – سورية .

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (5) العدد(2) 2021
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (5) No. (2) 2021

The Effect of Wetting and Drying Cycles on the Durability of Roller Compacted Concrete with Recycled Aggregates

Dr. MAJED ASAAD *
Dr. ALI KHEIRBEK **
En. ALI IBRAHIM ***

(Received 18/ 10/ 2020 . Accepted 9 / 3/ 2021)

□ ABSTRACT □

The recycling of construction and demolition waste is considered one of the issues that have occupied the attention of engineers recently due to the rapid development in construction works that necessitated the consumption of huge quantities of aggregates, which required searching for wider prospects in order to treat this wastes and convert them into aggregates that researches later proved their usability with restricted proportions in many applications such as roller compacted concrete.

Previous researches have achieved producing categories of compacted concrete using gradual proportions of recycled aggregates, and they gave values of compressive strength at 28day age exceeding 30MPa even at the maximum replacement ratios despite the relatively low cement content (250kg/m^3). And based on these positive previous results, the durability of this concrete was studied under the influence of wetting and drying cycles, considering that compacted concrete is used in constructions that are exposed to fluctuating climatic conditions.

The research studied the effect of subjecting concrete samples to repeated wetting and drying cycles (10, 20, 30 cycles) by determining the loss value in weight and compressive strength. We concluded that the concrete seemed to be affected a little, with a loss percentage in weight and strength (0.124%, 11.44%) respectively, when producing the concrete with recycled aggregates only and for 30 Cycles of wetting and drying.

Keys words: Roller compacted concrete, Construction and Demolition Waste, Recycled aggregates, Durability, Wetting and Drying Cycles, Weight, Compressive strength.

* Professor, Department Of Transportation and Structural Materials, Department Of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

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

*** Doctorate Student, Department Of Transportation and Structural Materials, Department Of Civil Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

1. مقدمة

تعتبر عملية إعادة تدوير (Recycling) نفايات الهدم والإنشاء (Construction and Demolition Waste) أكثر المنهجيات نجاحاً بين تلك التي اعتمدتها المؤسسات المختصة عالمياً كطريقةٍ للتخلص من هذه النفايات بعد أن كانت تستهلك سابقاً مساحاتٍ شاسعةٍ من الأراضي لإنشاء المطامر مثلاً، الأمر الذي حثّ المعنيين على تطوير آليّات جديدةٍ للاستفادة من الكميات الهائلة التي تنتج سنوياً من نفايات الهدم والأنقاض بهدف وضع أسسٍ لكيفيّة معالجتها وتحويلها إلى حصوياتٍ تؤمن ديمومةً واستمراريةً أطول بالنسبة لمصادر الحصويات الطبيعية (Natural Aggregates) غير المتجددة، وقد استغرق الأمر وقتاً طويلاً وعدداً هائلاً من الأبحاث العلميّة لإثبات مدى قابليّة الحصويّات المعاد تدويرها (Recycled aggregates) للاستعمال في خلطات البيتون الإنشائيّ كالبيتون المرصوص بالدحي (Roller compacted concrete) الذي بدأ استخدامه عالمياً نتيجة التطور التكنولوجي الهائل وأساليب الإنشاء والتنفيذ الحديثة فضلاً عن تذبذب أسعار المشتقّات النفطيّة وتزايد أهمية شبكات الطرق ما تَطَلّب تطوير تقنيّاتٍ لتصميم وتنفيذ رصفٍ طرقيٍ من المواد الأولية المتوفرة.

في سوريا وحتى وقتٍ قريبٍ، يعتبر استعمال المواد المعاد تدويرها محدوداً جداً حيث اقتصر على بعض التطبيقات محدودة الأهمية (الخلطات البيتونيّة ذات الاستخدامات غير الإنشائية، الردميات الطرقية .....) رغم ما تملكه هذه المواد من مواصفاتٍ تسمح لها بالاستخدام وفق اشتراطاتٍ محدّدة في مختلف الأعمال الهندسية، ممّا دفعنا للقيام بسلسلةٍ من الأبحاث بدأت بتحديد مدى إمكانيّة استعمال الحصويّات المعاد تدويرها في إنتاج البيتون المرصوص. ومع النتائج الإيجابيّة التي تمّ التوصّل إليها (مقاوماتٍ على الضغط البسيط بعمر 28day تجاوزت 30MPa حتّى عند استعمال الحصويّات المعاد تدويرها بنسبة 100%)، بدأنا البحث في ديمومة هذا النوع الخاص من البيتون باعتبار أنّه قد يستعمل في منشآتٍ عالية الأهميّة كالطرق بأنواعها ومهابط المطارات وساحات ومستودعات الموانئ وما تتعرّض لها هكذا منشآتٍ من حمولاتٍ مروريّة متكرّرة وظروف مناخيّة متقلبةٍ قاسية.

تمّت دراسة بارامترٍ هام وهو حلقات التجفيف والترطيب المتكرّرة لملاحظة الضرر الذي سيلحق بالبيتون جرّاه تعرّضه لعددٍ متزايدٍ من الحلقات (10, 20, 30 cycles).

نعرض فيما يلي تقديماً مبسّطاً عن البيتون المرصوص بالدحي (RCC) وأهم العوامل التي تؤثّر على ديمومته إضافةً لبعض اختبارات ومؤشرات الديمومة المُعتمدَة عالميّاً ومنها حلقات التجفيف والترطيب.

1-1. البيتون المرصوص بالدحي (Roller Compacted Concrete) (RCC)

إن البيتون المرصوص بالدحي هو أحد الأنواع الخاصة من البيتون، يتكون بشكلٍ رئيسيٍ من نفس المواد التي تشكّل البيتون التقليدي (الحصويّات، الماء، نسب منخفضة من الإسمنت)، ولكن مايميّزه أنه أكثر جفافاً (تماسكاً) بهبوطٍ معدوم [1].

لقد أشارت كودات التصميم البلجيكية (RW99) إلى أن المتطلّبات الدنيا المطلوبة لهذا النوع من البيتون المستخدم في الأعمال الهندسية (المواصلاتية) هو (BSC 20) و(BSC 30)، وبمحتوى من الاسمنت kg/m^3(250-200) ما يتوافق مع مقاومةٍ على الضغط البسيط N/mm^2(20-30) [1].

إن أداء البيتون المرصوص بالدحي 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 [2] .

1-2. ديمومة البيتون المرصوص بالدحي

يعتبر البيتون المرصوص بالدحي وكما هو الحال بالنسبة للبيتون التقليديّ معرّضاً لكثيرٍ من التشوهات والتلف كنتيجةٍ لتأثير عوامل متعدّدة كالتآكل والاحتكاك وحلقات التجمّد والذوبان المتلاحقة أو التعرّض لبعض المواد الكيميائيّة المخرّبة كالمواد الكبريتيّة والأحماض مثلاً [3].

تتأثّر ديمومة البيتون المرصوص بالدحي بعديد العوامل:

قيم المقاومة، محتوى المواد الإسمنتيّة، جودة الحصويّات المستعملة، درجة الرصّ، النفاذيّة [4].

إن الرصّ غير الملائم لهذا النوع الخاص من البيتون (RCC) ينقص من ديمومته، فقد أثبتت المشاهدات الحقليّة والإحصائيّة أنّ أداء وديمومة البيتون المرصوص بالدحي تتبع بشكلٍ حاسمٍ لجودة وتجانس وكتامة سطح الرصف النهائيّ، لذلك يجب إيلاء ألية الرصّ المتّبعة اهتماماً بالغاً لتُنجز بمايتوافق مع متطلبات الكثافة الأعظميّة والجودة العالية لإنتاج سطح رصفٍ كتيم خالٍ من الشقوق والتجاويف وغيرها من التّشوهات التي يمكن أن تظهر في مناطق الوصلات وحوافّ الطريق، بينما يؤمّن الرصّ وفق الألّيّة المناسبة زيادة قدرة تحمّل المرصوص ومقاومته للاحتكاك.

إنّ انخفاض كثافة البيتون المرصوص في مناطق الفواصل الطوليّة والعرضيّة بنسبةٍ تصل لـ 10% مثلاً مقارنةً بكثافة الجزء الداخليّ سيؤدّي إلى حدوث تآكلٍ وتخلخلٍ وتشوه على امتداد هذه المناطق، يتحقق ضمان الرصّ الجيّد على امتداد الفواصل الإنشائية عبر تقليل الفترة الزمنيّة الفاصلة بين مدّ ودحي خطّين متجاورين ممّا يؤمّن إنجاز عمليّة الرصّ وفق ظروفٍ مثاليّة (زمنيّاً) [5].

1-3. بعض اختبارات ومؤشّرات الديمومة لمختلف أنواع البيتون وخاصّة البيتون المرصوص

1-3-1 مقاومة التآكل والاحتكاك (Abrasion / Erosion Resistance)

تعتمد مقاومة البيتون المرصوص للتآكل والاحتكاك بشكلٍ كبيرٍ على مقاومته على الضغط البسيط وجودة الحصويّات المستعملة. يتمّ استخدام ASTM C 1138 لتقييم مقاومة الاحتكاك والتآكل لكل من البيتون المرصوص والبيتون التقليديّ. غالباً ماتكون خلطات البيتون المرصوص التي تنتج بنسب (w/c) منخفضةٍ وحصويّاتٍ بمقاساتٍ كبيرةٍ مماثلةً للبيتون التقليديّ المنتج باستعمال نفس المكونات من حيث مقاومة التآكل والاحتكاك [4].

1-3-2 مقاومة حلقات التجمّد والذوبان (Resistance to Freezing and Thawing Cycles)

لاتملك خلطات البيتون المرصوص عموماً كمّية كبيرة من الفراغات الهوائيّة، وبالتالي فإنّها غالباً ماتكون بمقاوماتٍ منخفضةٍ لتأثير التجمّد والذوبان المتلاحق وخاصّةً في ظروف رطوبة الإشباع، بينما دلّت كثيرٌ من الأمثلة على الأداء الحقليّ الجيّد الذي قدّمه البيتون المرصوص عند تواجده في مناطق ليست رطبةً لدرجة الإشباع رغم قلّة الفراغات الهوائيّة. يتمّ تحديد مقاومة البيتون المرصوص لتأثير (التجمّد، الذوبان) بالاعتماد على ASTM C 666، وكثيراً ماتستعمل مولّدات الهواء كإضافةٍ تؤمّن زيادة كمّية الفراغات الهوائيّة في عيّنات البيتون المرصوص بهدف تحسين مقاومته لتأثير (التجمّد، الذوبان) المتكرّر [4].

1-3-3 الانكماش (التقلّص) (Shrinkage)

يُعزَى أي تغيّر ملحوظ في حجم رصف البيتون المرصوص المنفذ إلى التقلّص الناجم عن الجفاف، وغالباً ماتكون قيمة التغير في الحجم هذه أقل مقارنةً بالبيتون التقليدي نظراً لمحتوى الماء الأقل في خلطات البيتون المرصوص إضافةً للكميّة الأقلّ من الملاط الإسمنتيّ [6].

1-3-4 النفاذية (Permeability)

تعّرف نفاذيّة البيتون عموماً بأنّها الخاصيّة التي تتحكّم بمعدل التدفّق لسائلٍ أو غاز ضمن هذه المادّة المساميّة تحت تأثير ضغطٍ محدّد، وتحدّد بقياس معامل النفاذية (k) [7]. أظهرت عديد الدراسات التجريبيّة انخفاض نفاذيّة البيتون بالتزامن مع تقدّم عمليّة الإماهة للمواد الإسمنتيّة وكذلك من خلال تخفيض نسبة (w/c) المعتمدة [8].

1-3-5 مقاومة تأثير الأحماض والكبريتات (Resistance to Acid and Sulfate Attacks)

إنّ تعرّض مختلف أنواع البيتون لتأثير المواد الكيميائية المخربة كالكبريتات مثلاً، والتي قد تتواجد بكميّاتٍ كبيرة في الترب والمياه سيسبّب لها كثيراً من التشوهات (خاصّةً في حال عدم اتّخاذ الاحتياطات التصميميّة اللّازمة). وبشكلٍ مشابه، سيتضرّر البيتون بشكلٍ كبير عند وصول الأحماض الكيميائية إلى نسيجه الداخلي عبر تحلّل الملاط الإسمنتيّ الرابط بسرعةٍ تتناسب مع تركيب وتركيز الحمض. وتعتبر الحصويّات الكلسيّة المستخدمة في إنتاج الخلطات البيتونية الأكثر تأثّراً بين مختلف أنواع الحصويات جراء التفاعل مع الأحماض [8]. يتمّ إجراء اختبار مقاومة الحمض لمختلف أنواع البيتون استناداً إلى (ASTM C 267).

1-3-6 مقاومة حلقات الترطيب والتجفيف (Resistance to Wetting and Drying Cycles)

يُعتبَر هذا الاختبار مهمّاً جدّاً من أجلِ دراسةِ تأثّر المنتج البيتونيّ بالظروف المناخيّة المحيطة، وخاصّة عند استعمال بعض الأنواع المميّزة من البيتون الإنشائيّ كالبيتون المرصوص بالدحي (RCC) مثلاً والذي يتمتّع بخصوصيّةٍ كبيرة بحكم استعماله في منشآت النقل (الطرق، طبقات رصف المطارات ....) التي تتعرّض لظروفٍ مناخيّة متقلّبة على مدار العام.

يولى اختبار مقاومة حلقات (الترطيب، التجفيف) اهتماماً إضافياً في المناطق الاستوائيّة وغيرها من الأماكن المعرّضة لهطولاتٍ مطريّة موسميّة غزيرة وما ينتج عنها من حلقاتٍ متكرّرة من الترطيب والتجفيف، هذه الحلقاتُ المتلاحقة ستسبّبُ تغيّراً في حجمِ المواد الإسمنتيّة المشكّلة للملاط اللّاصق ممّا يؤدّي إلى إضعاف قوى التماسك والتلاصق بين مختلفِ مكونات الخليط البيتونيّ. يجرى هذا الاختبار استناداً إلى (ASTM D 559) الخاصّ بإجراء اختبار التجفيف والترطيب للترب الإسمنتيّة المرصوصة [9]. يؤثّر التجفيف والترطيب المستمر أيضاً على ديمومة الحصويّات المستعملة عبر تغيّر وتفاوت معامل التمدّد والتقلّص الخاصّ بها تبعاً لدرجات الحرارة ومحتوى الرطوبة الأمرُ الذي يؤدّي إلى نشوء إجهاداتٍ كبيرة تُحدِثُ تغيّراً دائماً في حجم البيتون ماقد يسبّب تشقّقه وانهياره [8].

2. أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث بشكلٍ رئيسيّ إلى دراسة تأثير حلقات الترطيب والتجفيف المتكرّرة على خصائص البيتون المرصوص بالدحي المصنّع باستخدام نسب استبدالٍ متدرجةٍ للحصويّات الطبيعيّة بالحصويّات المعاد تدويرها ولحظ التغيّرات الحاصلة على خصائصه (الوزن، المقاومة على الضغط البسيط) بالتزامن مع زيادة نسب الاستبدال، نظراً للأهميّة الكبيرة التي تكتسبها خصائص وبارامترات الديمومة للبيتون المرصوص خاصّةً عند استعماله في أماكنَ تتعرّض لتقلّباتٍ مناخيّةٍ موسميّةٍ كبيرة، بحيث يضمن هذا المنتج البيتونيّ استقرار المنشأة المنفّذة عبر تقديم أفضل أداء استثماري ممكن. وتكمن أهميّة البحث في تعزيز الثقة باستعمال الحصويّات المعاد تدويرها كرديفٍ حقيقيّ إلى جانب الحصويّات الطبيعيّة عبر اختبار أداء البيتون المرصوص المصنّع باستعمالها تحت تأثير أحد بارامترات الديمومة الهامّة جدّاً (حلقات الترطيب والتجفيف) بعد أن أعطت هذه الحصويّات قيماً مشجعةً للمقاومة على الضغط البسيط بعمر 28day حتّى في أقصى حالات الاستبدال 100%.

3. طرائق البحث ومواده

أُعتمِدَت المنهجيّة التجريبيّة في إجراء البحث من تصنيع عيّناتٍ مخبريّةٍ من البيتون المرصوص وفقَ نسب استبدالٍ مختلفةٍ للحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها وتحديدِ تغيّر قيم الوزن والمقاومة على الضغط البسيط بعد تعريض العيّنات لحلقاتٍ متلاحقةٍ من التجفيف والترطيب وفق (10, 20, 30 cycles).

تمّ إحضار مخلّفات وأنقاض الهدم من موقعٍ لبناءٍ مهدومٍ في مدينة اللاذقية، مشتملةً على كتلٍ متفاوتةٍ في حجومها 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 بالدحي، بينما تم إحضار الحصويات الطبيعية (بحص طبيعي، رمل ناعم، رمل خشن) والإسمنت من أحد المراكز المخصصة لبيع مواد البناء في مدينة اللاذقية.

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

- **المرحلة الأولى**: إحضار الكمّية المطلوبة من الأنقاض من موقع البناء المهدوم 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 مخابر كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين، ليكون القطر الأعظمي للحصويات المنتجة بحدود (19mm = Dmax).
- **المرحلة الثالثة**: توصيف الحصويات (المعاد تدويرها، الطبيعية) عبر إجراء التجارب المخبريّة اللازمة.
- **المرحلة الرابعة**: اعتماد التصميم الأمثل لخلطات البيتون المرصوص باستعمال الطريقة الفرنسيّة (Dreux-Gorisse) وتعديل نسبة الماء اعتماداً على اختبار بروكتور المعدّل.

- **المرحلة الخامسة:** إنتاج عيّنات البيتون المرصوص بالدحي وإخضاعها لحلقاتٍ متلاحقةٍ من الترطيب والتجفيف (10, 20, 30 cycles).
- **المرحلة السادسة:** مرحلة اختبار العيّنات البيتونيّة المصنّعة

3-1. مواصفات المواد الداخلة في خلطات البيتون المرصوص بالدحي

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=2,7g/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.

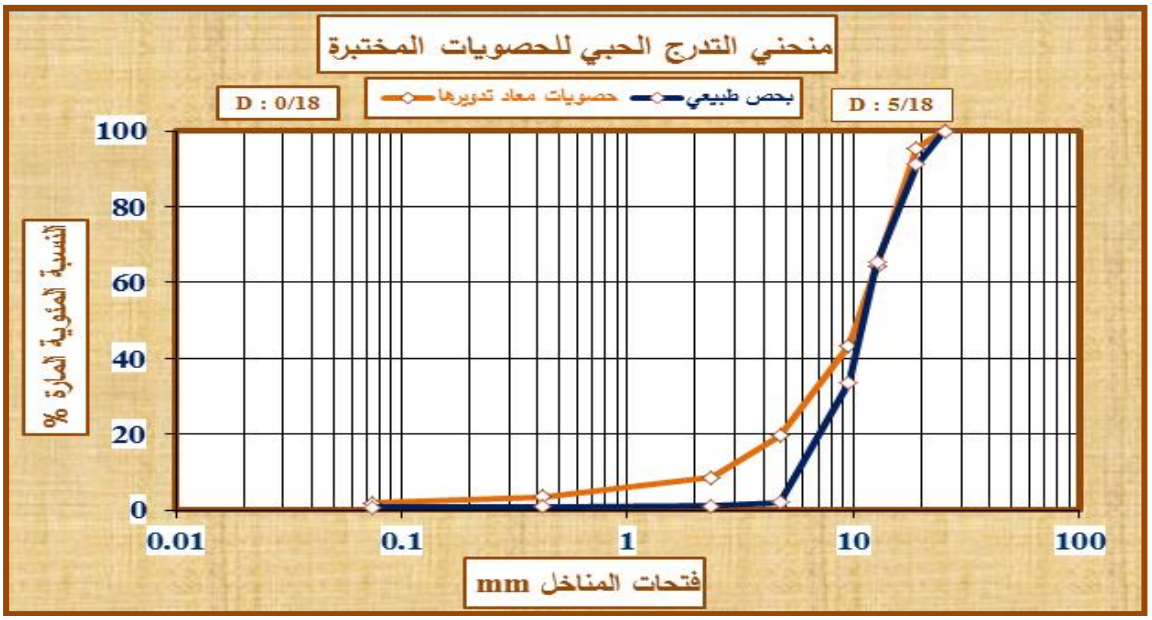
e) **إسمنت بورتلاندي عادي أسود تصنيف I** :إنتاج معمل إسمنت طرطوس بصنف 32,5.

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

3-1-1. توصيف الإحضارات

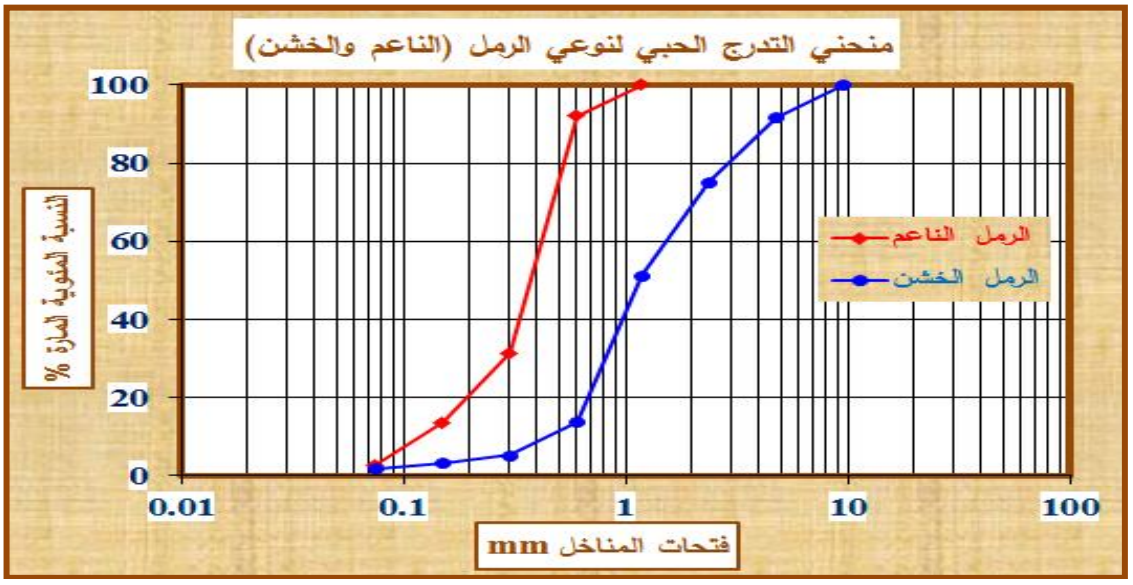
أجريَت مجموعة من التجارب المخبريّة التوصيفيّة (التحليل الحبي، الكتلة الحجمية الظاهريّة والكتلة الحجميّة الصلبة، معامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس، المكافئ الرملي، التشرب) بهدف التحديد الدقيق لخصائص الحصويات المستعملة في إنتاج البيتون (بحص طبيعي، رمل ناعم، رمل خشن، حصويّات معاد تدويرها).

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



الشكل (1): منحني التدرج الحبي الخاص بالحصويات المختبرة

أما منحنيات التدرج الحبي لنوعي الرمل المستخدمين في إنتاج البيتون المرصوص فهي موضّحة 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): قيم الكتلة الحجمية الظاهرية والصلبة للحصويات المختبرة

العينة	الكتلة الحجمية الظاهرية kg/l أو t/m^3	الكتلة الحجمية الصلبة kg/l أو t/m^3
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 اختبار معامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس وكذلك درجة التشرب للحصويّات المستخدمة:

الجدول (2): قيم درجة التشرّب ومعامل الاهتراء وفق لوس أنجلوس 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 بالدحي.

3-2. تصميم خلطات البيتون المرصوص بالدحي [10, 11].

- تم اعتماد الطريقة الفرنسيّة (Dreux-Gorisse) في تصميم الهيكل الحصوي لخلطات البيتون المرصوص،

وقد تمّ التصميم على مرحلتين:

1. تصميم العجينة الرابطة (قانون بولومي)
2. تصميم الخلطة الحصوية

- حُدّدت نسب مختلف المكونات التي ستدخل في إنتاج الخليط البيتونيّ اعتماداً على طريقة التصميم الفرنسيّة مع التأكيد على أنّ كمية الماء التصميمية (W) قد حدّدت بشكلٍ دقيق بعد إجراء اختبار بروكتور المعدّل. تمّ اعتماد القيمة الوسطيّة بين كميّة الماء النظريّة (بولومي) وكميّة الماء التجريبيّة (بروكتور) ومايتوافق معها من محتوىً 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.
- تمّ اعتمادُ 3 خلطات للبيتون المرصوص بنسب استبدال مختلفة %(0,50,100) بحيث يشير الرمز CN100 إلى بيتون بحصويات طبيعية دون استبدال، والرمز CR100 إلى بيتون استخدمت فيه الحصويات المعاد تدويرها بنسبة 100% وكذلك الأمر بالنسبة لـ CR50 .
- تم تثبيت محتوى الإسمنت في كل الخلطات ($250Kg/m^3$) (وهي قيمة اقتصاديّة تتلاءم مع البيتون المرصوص)، حجم الهواء $20L/m^3$، المقاومة التصميميّة بعد التصعيد $230kg/cm^2$.

تم استخدام نوعين من الرمل لإنجاز الدراسة التجريبية (رمل ناعم، رمل خشن)، تمّ إيجاد نسب المزج المثلى بحيث تحقّق معامل نعومة لمزيج الرمل بحدود 2.77 (تعتبر هذه القيمة مثاليّةً للرمل المستخدم في إنتاج الخلطات البيتونيّة عموماً)، وكانت نسب المزج: **58% رمل خشن، 42% رمل ناعم**

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 %
CN100	59	17.2	23.8
CR50	65	14.7	20.3
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/m3)	حصويات معاد تدويرها (kg/m3)	رمل ناعم (kg/m3)	رمل خشن (kg/m3)	إسمنت (kg/m3)	ماء (kg/m3)	نسبة الماء (%)
CN100	1275	-	339	500	250	120	5.08
CR50	712	628	293	433	250	110	4.75
CR100	-	1350	263	388	250	100	4.44

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

الخلطة CN (7%)، الخلطة CR50 (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) ومايتوافق معها من محتوىً للماء في $1m^3$ من البيتون مع تعديل أوزان المكونات الحصويّة:

الجدول (5): التصميم النهائي لخلطات البيتون المرصوص المعتمدة

الخلطة	بحص طبيعي (kg/m^3)	حصويات معاد تدويرها (kg/m^3)	رمل ناعم (kg/m^3)	رمل خشن (kg/m^3)	إسمنت (kg/m^3)	ماء (kg/m^3)
CN100	1239	-	329	486	250	143
CR50	682	601	281	415	250	143
CR100	-	1275	248	366	250	144

3-3. إنتاج عيّنات البيتون المرصوص بالدحي مخبريّاً وإخضاعها لحلقات (التجفيف، الترطيب)

اعتُمِدَت منهجيّة الخلط الآلي لمكوّنات البيتون المرصوص في الخلّاط، تمّت إضافة الأوزان التصميميّة بعد أن تمّ تجفيفها في الفرن لمدة يومٍ كاملٍ بدرجة 105 درجة مئوية. تلخصت منهجيّة صنع العيّنات مخبريّاً بإضافة الوزن الأعظمي الذي يتلقاه القالب والمحدّد مسبقاً على طبقاتٍ (سمك الطبقة الواحدة منها 50mm تقريباً) حيث تتلقى كل طبقة (50 ضربة موزّعة على كامل مساحة القالب) بواسطة قضيب فولاذي (ϖ25mm) [12]، وذلك بالتزامن مع وضع القالب على الطاولة الرجّاجة التي تساعد على إملاء القالب بشكلٍ كامل للوصول إلى الكثافة التصميميّة المستهدَفة.

تمّ تحديد الوزن الأعظميّ الذي سيضاف للقالب بشكلٍ دقيق وذلك بالاعتماد على اختبار بروكتور المعدّل (حجم القالب*الكتلة الحجميّة الأعظميّة)، شكّل هذا المعيار الأساسيّ لضمان الوصول إلى إنتاج بيتونٍ مرصوص بخصائص مناسبة نظراً لارتباط جودته بشكلٍ كبير ببارامترين رئيسيّن هما: **درجة الرصّ والكتلة الحجميّة.**

بعد الانتهاء من إنتاج العيّنات، تُترَك في القالب لمدّة 24hour ثمّ تُفَكّ وتُحفَظ في الماء مدّة 28day قبل أن تخضعَ لحلقات التجفيف والترطيب المتلاحقة استناداً إلى ASTM D 559، حيث توضَع العيّنات في الماء لمّدة 5hour بدرجة حرارة الغرفة ثم توضع في الفرن بدرجة 71 درجة مئويّة لمدّة 42hour لتكون مدّة الحلقة الواحدة مايقارب اليومين تقريباً [13]، وتُجرَى قياسات الوزن والمقاومة على الضغط البسيط بعد العدد المحدّدٍ من الحلقات لتحديد قيم الفاقد في كلّ من منهما بالمقارنة مع العيّنات غير المعرّضة للتجفيف والترطيب المتلاحق.

4. النتائج والمناقشة:

حُدّدِت قيم الأوزان (Weight) والمقاومة على الضغط البسيط (Compressive Strength) بعمر 28day لعيّناتٍ مكعبيّة بأبعاد cm(10*10*10) من مجمل خلطات البيتون المرصوص المعتمدة، وذلك قبل أن يبدأ تطبيق حلقات التجفيف والترطيب وفقاً ASTM D 559. علماً أنّ كلّ قيمةٍ سترد في الجداول والمخطّطات هي وسطي ثلاث عيّنات مختبرةٍ من البيتون المرصوص.

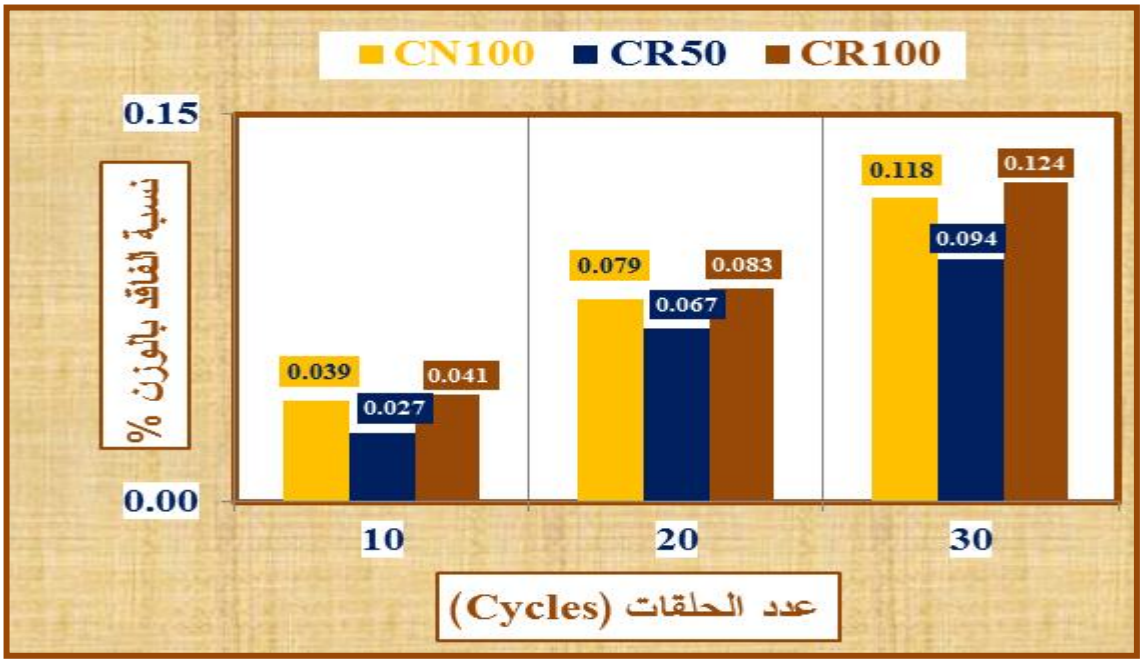
1-4 نتائج دراسة تأثير حلقات التجفيف والترطيب المتلاحقة على قيم الوزن لخلطات البيتون المرصوص المصنّعة

لقد حقّقت عيّنات البيتون المرصوص من مجمل الخلطات المصنّعة بعمر 28day قيماً للأوزان الطبيعيّة تجاوزت 2420gr حتى في أقصى حالات الاستبدال من الحصويّات المعاد تدويرها (CR100)، وقد بلغت قيمة هذا الوزن 2544gr للخلطة (CN100) و2492.67gr للخلطة (CR50) (الجدول (1)) الأمر الذي يعطي انطباعاً جيّداً عن النجاح في الوصول إلى اكتنازٍ عالٍ للبيتون. يبين الجدول (1) قيم الأوزان لخلطات البيتون المرصوص قبل الاختبار وبعد التعرّض لحلقات التجفيف والترطيب المتلاحقة (10, 20, 30 Cycles) مع قيم الفاقد الموافق.

الجدول (1): قيم الأوزان للخلطات المصنّعة من البيتون المرصوص قبل وبعد الاختبار إضافةً لقيم فاقد الوزن

اسم الخلطة	الوزن قبل الاختبار (gr)	الوزن بعد الاختبار (gr)					
		10 cycles	قيمة الفاقد %	20 cycles	قيمة الفاقد %	30 cycles	قيمة الفاقد %
CN100	2544	2543	0.039	2542	0.079	2541	0.118
CR50	2492.67	2492	0.027	2491	0.067	2490.33	0.094
CR100	2421.33	2420.33	0.041	2419.33	0.083	2418.33	0.124

لوحِظَ ازديادُ قيم الفاقد بالوزن لخلطات البيتون المرصوص بالدحي بالتزامن مع ازدياد عدد الحلقات، وقد حقّقت الخلطة (CR50) الأداءَ الأفضل حيث بلغت قيم الفاقد 0.027% (10 Cycles) و0.067% (20 Cycles) و0.094% (30 Cycles) كما هو موضّحٌ في الشكل (1)، بينما كانت النتائج متقاربةً جدّاً بين بيتون الحصويّات الطبيعيّة الصرفة (CN100) والبيتون الذي أنتج باستعمال الحصويّات المعاد تدويرها فقط (CR100)



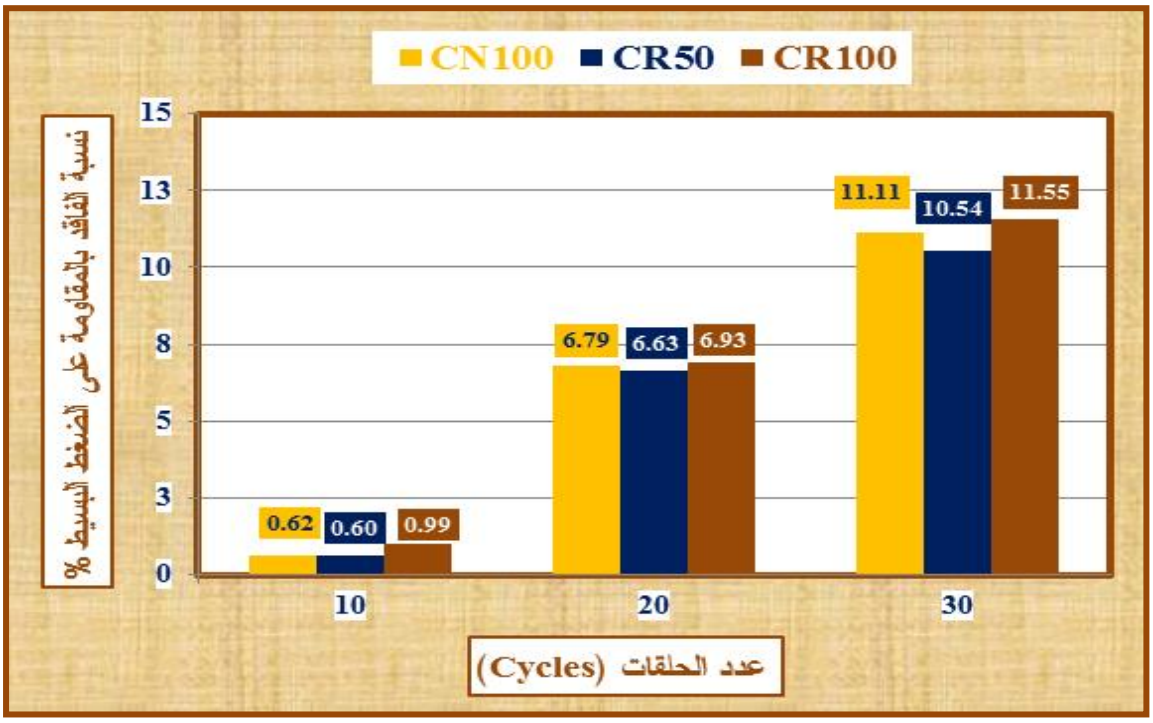
الشكل (1): مقارنة تأثير عدد حلقات التجفيف والترطيب على قيم الفاقد في الوزن لخلطات البيتون المرصوص

2-4 نتائج دراسة تأثير حلقات التجفيف والترطيب المتلاحقة على قيم المقاومة على الضغط البسيط لخلطات البيتون المرصوص المصنّعة.

لم تنخفض قيم المقاومة على الضغط البسيط لخلطات البيتون المرصوص بعمر 28day عن 30MPa بما ينسجم مع القيم العالية للكتلة الحجميّة. لقد كانت قيم الفاقد بالمقاومة لمجمل الخلطات لحدود 10 حلقة من الترطيب والتجفيف محدودةً جدّاً وقد بلغت %(0.62, 0.6, 0.99) للخلطات (CN100, CR50, CR100) على الترتيب ممّا يُعتبر إيجابيّاً جدّاً (الجدول (2) والشكل (2)).

الجدول (2): قيم المقاومة على الضغط البسيط لخلطات البيتون المرصوص قبل وبعد الاختبار مع قيم فاقد المقاومة الموافق

اسم الخلطة	المقاومة قبل الاختبار (MPa)	المقاومة على الضغط البسيط بعد الاختبار (MPa)					
		10 cycles	قيمة الفاقد %	20 cycles	قيمة الفاقد %	30 cycles	قيمة الفاقد %
CN100	32.4	32.2	0.62	30.2	6.79	28.8	11.11
CR50	33.2	33	0.6	31	6.63	29.7	10.54
CR100	30.3	30	0.99	28.2	6.93	26.8	11.55



الشكل (2): مقارنة تأثير عدد حلقات التجفيف والترطيب على قيم الفاقد في المقاومة لخلطات البيتون المرصوص

وكما هو الحال بالنسبة لقيم الأوزان، فقد تقاربَت القيم بين خلطتي الحصويات الطبيعيّة والحصويات المعاد تدويرها الصرفة (CN100) و(CR100) من أجل عدد الحلقات المتّبع (10, 20, 30). لم تتجاوز قيمة الفاقد في المقاومة على الضغط البسيط الـ 11.55% وكان ذلك بالنسبة للخلطة (CR100) من أجل 60 حلقة، مع ملاحظة أنّ قيم فاقد المقاومة بالنسبة لجميع الخلطات قد ازدادت مع تزايد عدد الحلقات.

5. الاستنتاجات و التوصيات

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

1. لم تؤثّر عمليّة استبدال الحصويّات الطبيعيّة بالحصويّات المعاد تدويرها بشكلٍ سلبي ملحوظ على ديمومة البيتون المرصوص المصنّع وفق البارامتر المدروس، بل حقّق استعمالها بنسبة 50% (CR50) نتائج أفضلَ نسبيّاً من بيتون الحصويّات الطبيعيّة (CN100). ويعزى ذلك إلى احتواء حصويّات أنقاض ونفايات الهدم على كميّةٍ من المواد الناعمة المارّة من المنخل N_{200} (حوالي 1,8% في بحثنا) والتي تلعب دور المادة المالئة (filler) عند إنجاز عمليّة الرص، كما تنسحق أجزاء الملاط القديم الملتصق بالجزيئة الحصويّة تحت تأثير آليةّ الرصّ المتّبعة لتسهم في زيادة اكتناز البيتون المصنّع باستعمالها، وبمجمل هذين العاملين يُنتَجُ البيتون بتشابكٍ قويّ واكتنازٍ مثاليّ 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)، ليشكّل بيتون الحصويّات المعاد تدويرها في أقصى نسب الاستبدال (100%) منتجاً بديمومة قريبةٍ من بيتون الحصويات الطبيعية وفق بارامتر حلقات التجفيف والترطيب.

2. لقد كانت قيم فاقد الوزن محدودة جدّاً لمجمل الخلطات رغم تقدّم عدد حلقات الترطيب والتجفيف وصولاً إلى 30 حلقة، ولم يتجاوز 0.124% للخلطة (CR100). انخفضت قيم فاقد الوزن للخلطة (CR50) مقارنةً بالخلطة (CN100) من أجل مختلف عدد الحلقات (10, 20, 30)، أي أنّ استعمال الحصويّات المعاد تدويرها بنسبٍ تصل لـ 50% لم يحافظ على أداء الحصويّات الطبيعيّة فحسب بل حسّنها بنسبٍ بسيطة أيضاً، وقد كانت النتائج حتّى في أقصى نسب استعمال الحصويّات المعاد تدويرها 100% قريبةً جدّاً من بيتون الحصويّات الطبيعيّة.

3. كانت قيم المقاومة على الضغط البسيط لخلطات البيتون المرصوص بعد التعرّض لحلقات الترطيب التجفيف منسجمةً مع قيم الوزن من حيث المحافظة على الأداء الجيّد، فلم تنخفض المقاومة إلا بشكلٍ بسيطٍ جدّاً لم يتجاوز 1% لمجمل الخلطات خلال أوّل 10 حلقات، ووصلت نسب هذا الفاقد فيما بعد لما يقارب الـ 7% عند الوصول إلى 20 حلقة وبقيمٍ متقاربةٍ جدّاً بين الخلطات الثلاث المعتمدة وفق نسب الاستبدال. إنّ أعلى قيمةٍ لفاقد المقاومة بلغت 11.55% للخلطة (CR100) عند 30 حلقة وهي قيمةٌ مقبولةٌ جدّاً بالنظر إلى عدد الحلقات، مع ملاحظة أنّ الخلطة (CR50) قد أعطَت نتائج أفضل نسبيّاً مقارنةً بالخلطتين (CN100) و(CR100) ممّا يدلّ على الأثر الإيجابي فنيّاً لعمليّة الاستبدال من خلال المحافظة على قيم المقاومة (عدم تخفيضها) بالتزامن مع تقدّم عدد الحلقات.

4. لم يلحظ تشكّل شقوق أو تشوهات مرئيّة في مجمل العيّنات البيتونية وفق الخلطات المصمّمة بعد التعرّض لحلقات التجفيف والترطيب المتلاحقة.

5. ركّز بحثنا المنجز على دراسة أحد بارامترات الديمومة الهامّة للبيتون المرصوص بالدحي وهو حلقات التجفيف والترطيب، وقد كانت النتائج الأوليّة مشجعةً جدّاً لمزيدٍ من الاستقصاء حول

بارامترات ومؤشرات الديمومة الأخرى كمقاومة الاحماض والتشرّب والنفاذيّة وحلقات التسخين والتبريد وخاصّة في حالة استعمال الحصويّات المعاد تدويرها، باعتبار أن قطّاعات استعمال البيتون المرصوص كمنشآت النقل تتعرّض بشكلٍ مستمر لعوامل مخربة متعدّدة من تأثير مواد كيميائيّة قد تتمكّن من الوصول إلى سطح الطريق كأحماضٍ وكبريتات أو ظروفٍ مناخيّة متقلّبة (تجمد– ذوبان، تجفيف– ترطيب، تسخين– تبريد) وما لذلك من تأثيراتٍ على خصائص الرصف البيتونيّ المنفّذ.

المراجع

1. 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.

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

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

4. US Army Corps of Engineers, Engineering and Design, "*Roller-Compacted Concrete*", 2000.

5. ACI Committee 309, "*Compaction of Roller Compacted Concrete*", Committee309.5R-00, 2000.

6. CURCIC, G.; GRDIC, D.; RISTIC, N.; GRDIC, Z. " *Properties, Materials and Durability for Roller Compacted Concrete for Pavements* ", University Of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Nis, Serbia, 2015.

7. MEHTA, P.; WILLEM, H.; MICHEL, F.; COURARD, L. " *Use Of Concrete Recycled Aggregates In Roller Compacted Concrete* ", Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkeley, Third Edition, 2006.

8. KOSMATKA, S.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. " *Design and Control of Concrete Mixtures "*, Portland Cement Association, Fourteenth Edition, 2003.

9. RATCHASIMA, N. " *Influence of Repeated wetting-Drying Process on Unconfined Compressive Strength of cement Modified Crushed Rock Base* ", Department of Civil Engineering, Vongchavalitkul University, Thialand, 2015.

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

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

12. The Syrian Arab Code for designing and implementing structures with reinforced concrete.

13. ASTM D 559, Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, Annual Book of ASTM Standards.