

تأثير إضافة الفيلر على خصائص البيتون المرصوص بالدحي

الدكتور علي خيربك *

الدكتور بسام سلطان **

نعمة ديوب ***

(تاريخ الإيداع 12 / 10 / 2014. قُبل للنشر في 5 / 1 / 2015)

□ ملخص □

يقدم البيتون المرصوص بالدحي (RCC) مفهوماً مختلفاً في إنشاء الرصف والسدود فهو بيتون جاف (هبوط أبرامز معدوم)، ذو محتوى مائي منخفض، ومزيج كثيف يتضمن حصويات متدرجة الخشونة، ومواد إسمنتية رابطة وماء. مما يجعل من رصه بسماكات كبيرة أمراً صعباً بدون استخدام الرجاجات ذات الطاقة الكبيرة. ينقل هذا البيتون بالشاحنات، ويوضع ويرص باستخدام معدات الرصف الإسفلتي. تكمن الفائدة الرئيسية لهذه التقنية في تخفيض زمن الإنجاز والتوفير في كلف العمل وإمكانية الاستعاضة عن المواد التقليدية في الرصف الطرقي. كما يؤمن سطحاً متيناً ومصقولاً وأمسلاً من شأنه تسهيل عمليات المرور المتوقعة في كل الظروف والعوامل المختلفة كالحمل المحوري والشروط البيئية.

يقدم هذا البحث تكنولوجيا جديدة لصناعة عينات البيتون المرصوص بالدحي بتطبيق آلية الرج-الضغط Vibro-compaction بشكل متتال على العينات البيتونية الطرية. تم تصنيع عينات بيتونية مخبرياً تختلف بمحتواها من الفيلر الكلسي، وبعد إجراء الدراسة التحليلية لنتائج اختبارات هذه العينات تم التوصل إلى المحتوى المثالي للفيلر لهذا النوع من البيتون وذلك باعتماد المقاومة على الضغط البسيط وسرعة تطورها مع الزمن كمعيارين أساسيين للتصميم.

الكلمات المفتاحية: البيتون المرصوص بالدحي، البيتون، المقاومة على الضغط البسيط، الفيلر الكلسي، بروكتور، الكثافة العظمى، الرص - الاهتزاز، النفاذية، الديمومة.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة وإدارة التشييد - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم هندسة النقل والمواصلات - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة النقل والمواصلات - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

The Effect of Adding Filler For The Properties of The Roller Compacted Concrete (RCC)

Dr. Ali Kheirbek*
Dr. Bassam Sultan**
Numa Dayoub***

(Received 12 / 10 / 2014. Accepted 5 / 1 / 2015)

□ ABSTRACT □

The Roller Compacted Concrete (RCC) offers a different concept in the creation of pavement and concrete dams it's dry Beaton (Zero Abrams slump), with a low water content, and includes of dense mix consisting of graded coarse aggregate, and cementations materials, and water, this makes it so difficult to compact it in big thicknesses layers without using large energy rollers compactors. concrete conveys by trucks, placed and compacted by using equipment asphalt pavement. The main advantage of this technique is in reducing the completion time and cost savings in labor and the possibility of replacing traditional materials in road paving. It also provides a solid surface smooth and polished, and would facilitate the operations of traffic expected in all circumstances and various factors such as axial loads and environmental conditions.

This paper presents a new technology for the manufacture of Roller compacted concrete samples by applying a mechanism of Vibro-compaction pressure on samples of fresh concrete. It had Been manufactured concrete samples differ from their limestone filler content, and after conducting an analytical study of the results of tests of these samples has been reached to ideal feller content for this type of concrete by reliance on the mechanical strength and speed of evolution with time as criteria for the basic design.

* Associate Professor, Department of Management Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate Professor, Department of Engineering Transport and Communications, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate student, Department of Engineering Transport and Communications, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يعتبر البيتون العنصر الأساسي في عملية البناء، ونتيجة للتطور التكنولوجي السريع فقد ظهرت على الساحة أنواع جديدة من البيتون من أهمها البيتون المرصوص بالدحي Roller Compacted Concrete. حيث شهد العقد الماضي زيادة متصاعدة لتطوير هذا النوع من البيتون، كما ساهم التقدم في تكنولوجيا الإنشاء في زيادة استخدامه. تعتبر تقنية البيتون المرصوص بالدحي في أعمال الرصف الطرقي إحدى أشكال الرصف البيتوني الصلب. تطلب تزايد أهمية شبكات الطرق وتكلفتها العالية تطوير أساليب وتقنيات لتصميم وتنفيذ رصف طرقي من المواد الأولية المتاحة، بالإضافة للبحث عن مواد رصف جديدة كضرورة لإنشاء المشاريع الصناعية التي تتطلب قدرات تحمل عالية لا تستطيع مواد الرصف الأخرى تحقيقها بكلف مقبولة. يؤمن البيتون المرصوص بالدحي هذه المتطلبات بشكل فعال، كما أنه اقتصادي و يعمر طويلاً عند تنفيذه بالشكل المناسب، ولا يتطلب صيانة كبيرة يستخدم في تطبيقات الرصف العالي التحمل ذات السرعة المنخفضة، بما في ذلك الرصف الصناعي والمتعدد الأغراض. حيث يطبق الرصف بهذا البيتون في المرافق الصناعية، ومناطق الاستراحة على الطرق السريعة، وفي محطات الوزن، ومآزر وقوف الطائرات، ومرافق النقل المتعدد الوسائط بما فيها إصلاح وتوسيع أرصفة التحميل. ومع ذلك فإن العائق الرئيسي أمام التوسع في استخدام هذه التكنولوجيا يكمن في عدم وجود طريقة بسيطة وموثوقة لتحضير العينات المخبرية. إن العديد من الطرق الحالية لتحضير العينات المخبرية هي صعبة وتتطلب معدات خاصة [1].

لمحة تاريخية

استخدم هذا النوع من البيتون في الرصف الطرقي في وقت مبكر من ثلاثينيات القرن الماضي في السويد [2]. أما في أمريكا الشمالية، فقد قامت فيالق المهندسين في الجيش الأمريكي Army Corps of Engineers (USACE) التي تعتبر أحد الرواد باستخدام هذا النوع من الرصف ببناء مدرج مطار ياكما Yakima في واشنطن عام 1942 [3]. و دخل البحث الجدي لتطوير هذه التقنية حيز التطبيق عام 1970 من خلال مؤتمر متخصص في هذا الشأن في مونتريال- كندا [4].

تهدف هذه التقنية في الرصف الطرقي إلى تحقيق وفر اقتصادي فعال، و أمان و جودة للمنشأة تضمن لها عمراً استثمارياً عالياً. فقد استخدم في كندا في مناطق الصناعات الثقيلة في ظل صقيع شديد وأثبتت فعاليته في الأحمال الثقيلة و بكلف بناء منخفضة. و على مر السنين، أدخلت العديد من التطويرات على هذا البيتون لتحسين جودته وأدائه. يجمع البيتون المرصوص بالدحي بين أداء البيتون و موثوقيته، وبين التكلفة المنخفضة مقارنة بالإسفلت. وبالإضافة في الرصف الطرقي، يستخدم هذا البيتون بنجاح في بناء السدود. تكمن الفروقات بين التطبيقين في حجم الحصويات، التدرج، نسب الماء إلى الإسمنت، وطريقة الصب. كما أن الحصويات المستخدمة في الرصف أصغر، ونسبة الماء إلى الإسمنت أقل مقارنة بحالة استخدامه في بناء السدود.

تم تطوير هذا البيتون لأغراض الرصف لكي يلبي الحاجة إلى بناء رصف يتحمل حمولات ثقيلة في ظل ظروف حرارية قصوى. كان هذا البيتون بديلاً ناجحاً للإسفلت في ظل ظروف محددة عندما تكون لا تعتبر نعومة الطريق ضرورية. بالإضافة لأداء هذا البيتون الجيد ضمن ظروف الصقيع كما هو الحال في كندا، أو ضمن حرارة شديدة الارتفاع كما هو الحال في جنوب الولايات المتحدة الأمريكية.

وباستخدام هذا الببتون فإن الرصف يصبح أسرع ولا يحتاج إلى قوالب أو حديد تسليح. مما يوفر ما لا يقل عن 15-30% من التكلفة مقارنة بالرصف الببتوني التقليدي. كما أن المحتوى الأقل من الإسمنت في هذا الببتون يقدم وفورات إضافية [1].

يُستخدم الرماد المتطاير Fly Ash في صناعة خلائط الببتون المرصوص بالدحي بشكل واسع منذ بداية الثمانينات كمادة تسمح باستبدال جزء من الإسمنت البورتلاندي بنسب معينة حيث يعمل كمادة مالئة ناعمة جداً تسمح بإنهاء أعمال الرص بجودة عالية وتُغني عن استخدام الإضافات الكيميائية، كما أنها تحقق وفراً كبيراً في الإنشاء نتيجة لتخفيض المحتوى الإسمنتي. يملأ الرماد المتطاير الفراغات كإضافة صلبة ناعمة للخليط لتأمين المزيد من الرص بالإضافة إلى أنه يؤمن خصائص التصلب التي تعمل على تحسين المقاومة والديمومة. تحتوي عادة خلطات الـ RCC على رماد متطاير بنسبة 15 إلى 20% من الحجم الكلي للمواد الإسمنتية [6].

نتيجة لعدم توفر الرماد المتطاير في سورية استخدمنا في هذا البحث الفيلر كإضافة صلبة وتم دراسة تأثير إضافة الفيلر على خصائص الببتون المرصوص بالدحي، وذلك من حيث تأثيره على الخصائص الميكانيكية، وسرعة تطور مقاومته مع الزمن كعامل هام يتيح الاستثمار السريع للطرق. كما تستخدم الإضافات في الببتون من أجل:

- خفض حرارة الإماهة بحدود 60% مما يمنع حدوث التشققات الناتجة عن حرارة التفاعل [4].
- التوفير في كمية الإسمنت المضافة
- تحسين مقاومة الببتون لحرارة الإماهة و حمايته من التشققات التي قد تنتج عنها.
- تحسين قابلية التشغيل Workability بسبب البنية الكروية للحبيبات
- تخفيض التفاعل القلوي للحصويات (AAR) Alkali Aggregate Reaction مما يمنع التشققات
- تحسين مقاومة هجوم الكبريتات.

معايير تصميم خلطات الببتون المرصوص بالدحي

تتشابه طرق تصميم خلطات الببتون المرصوص بالدحي والببتون التقليدي عموماً، مع التنويه إلى وجود فارقين أساسيين يتمثلان بالعيار المنخفض للإسمنت في الخلطة، والمحتوى المتدني للماء فيها. وعادة ما يتم البحث عن نسبة الماء المثلى للوصول للمقاومة المطلوبة للحصول على ببتون بمواصفات ميكانيكية مقبولة تسمح باستخدامه في المنشآت المدنية المختلفة. يستدعي ذلك مراعاة مايلي:

- استخدام كمية كبيرة من المواد الناعمة (إسمنت - فيلر - رماد متطاير) لزيادة الكثافة وملء الفراغات بين الحصويات الناجم عن انخفاض كمية الماء؛
- استخدام حصويات بقطر أعظمي لا يزيد عن 19mm للمساهمة في الإملاء الجيد للبنية، وتحسين شروط الدحي أثناء التنفيذ؛
- الاختيار الجيد للإسمنت من حيث الصنف والمقاومة للعوامل الجوية، لضمان المواصفات الميكانيكية الجيدة للببتون المتصلب [5].

اختبارات الببتون المرصوص بالدحي

تهدف هذه الاختبارات إلى التحقق من الوصول إلى ببتون طري برطوبة مثالية وكثافة قصوى للوصول لدرجة الرص القصوى والحصول بالتالي على أعلى مقاومة ممكنة للببتون المرصوص بالدحي، تحدد هذه الاختبارات

المواصفات الأميركية للمواد (ASTM) American Society for Testing and Materials وغيرها من المواصفات الأوروبية [8] من أجل البيتون المرصوص بالدحي. لاختبار المقاومة يتم تحضير العينات باستخدام طاولة الرج أو المطرقة الرجاجة الضاغطة كما تحددها المواصفة ASTM C1435. ويستخدم اختبار الرج أو المطرقة الرجاجة لإنتاج أسطوانات الـ RCC بقطر 15×30 cm. تعتمد نتائج الاختبار على اكتناز المزيج والحد الأعلى لحجم الحصى وعلى عدد العينات. يمكن استخدام اختبار بروكتور المعدل لتحضير عينات البيتون المرصوص بالدحي باستخدام ASTM D1557 كما أن الضاغط الدوراني المستخدم عادة لتحضير عينات الإسفلت هو الطريقة الأحدث لتحضير عينات RCC وفق الاشتراطات الدولية (ACI Committee 207, 1999) [9].

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث لدراسة تأثير إضافة الفيلر المنتج محلياً على خصائص البيتون المرصوص بالدحي كإضافة صلبة، حيث تعمل هذه المواد كمادة مالئة تؤدي لزيادة اكتناز الخليط البيتوني، كما تعمل على خفض حرارة الإماهة الناتجة عن التفاعلات الإسمنتية التي تتم ضمن الخليط. يُستخدم لهذا الغرض عادةً المواد الناعمة كالرماد المتطاير (Fly Ash) وخبث الأفران العالية (Furnace Slag)، كنواتج نفايات صناعية، إلا أنها غير متوفرة في سورية وكبدلي عن هذه المواد، استُخدم في البحث الفيلر الكلسي (مطحون الحجر الكلسي القاسي) والذي تصل نعومته لدرجة قريبة من نعومة الإسمنت ($2100 \text{ cm}^2/\text{g}$)، وعمار منخفض من الإسمنت البورتلاندي ($C < 300 \text{ Kg/m}^3$). وكمرحلة أولى، تم البحث عن خلطات من البيتون المرصوص بالدحي تحقق المعايير الخاصة بهذا البيتون باستخدام المواد المحلية وبمقاومات لا تقل عن 200 Kg/cm^2 وهو ما أمكن تحقيقه دون استخدام الإضافات غير المتوفرة محلياً كالرماد المتطاير (Fly Ash) وخبث الأفران العالية (Furnace Slag). تجدر الإشارة هنا إلى أنه بالإمكان بعد التحقق من إمكانية استخدام الفيلر كإضافة بديلة للحصول على بيتون مرصوص بالدحي البحث لاحقاً عن وسائل أخرى للوصول بالمقاومة إلى قيم أعلى تسمح بالحصول على بيتون مرصوص بالدحي عالي المقاومة.

طرائق البحث ومواده:

تم اعتماد المنهجية التجريبية في إجراء البحث من خلال تحضير عدد من الخلطات تم اختبارها للتحقق من الوصول لمقاومات مقبولة حيث تم دراسة خلطات بيتونية متعددة بتغيير الإحضارات وتعديل نسبة الماء إلى الإسمنت (W/C) للوصول لأفضل اكتناز للخلطة البيتونية وذلك بحساب النسبة المثالية للماء برسم منحني بروكتور وذلك بإجراء تجربة بروكتور من أجل أربع نسب للماء من أجل كل نسبة فيلر ومن أجل الخلطة المرجعية التي لم يضاف لها فيلر. بعد حساب نسبة الماء المثالية من أجل كل نسبة فيلر، تم صب عينات من البيتون الناتج للتحقق من تجانسه ومقاومته الميكانيكية بعد التصلب لتحديد نقاط تحسين الخلطة الممكنة ورفع أداء البيتون بعد تصلبه.

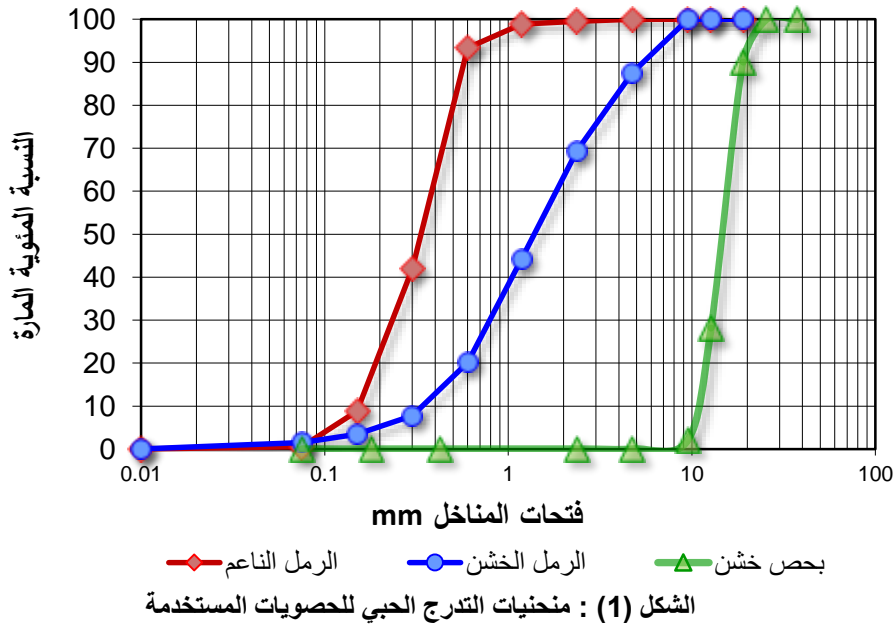
1. الإحضارات: استُخدمت في البحث لتحضير الخلطات البيتونية المختلفة المواد التالية:

• **إسمنت بورتلاندي عادي أسود تصنيف I** صنع معمل إسمنت طرطوس مُصنَّع وفق المواصفة السورية

رقم 1987/63 بصنف 32.5 [10].

- **رمل نهري من مقالع مرقية (منطقة بانياس)** خشن نسبياً بمعامل نعومة قدره $MF=3.68$ بلون بني فاتح، نظيف جداً بقيمة متوسطة للمكافئ الرملي تعادل $ES=97.8\%$.
- **رمل ناعم من مقالع منطقة القريتين (رمل قرواني)** ناعم نسبياً بمعامل نعومة قدره $MF=1.58$ نظيف جداً بقيمة متوسطة للمكافئ الرملي تعادل $ES=96.42\%$.
- **فيلر كلسي أبيض** نعومته قريبة من نعومة الإسمنت (سطحه النوعي يساوي $2100\text{cm}^2/\text{g}$) ووزنه الحجمي الصلب يماثل الوزن الحجمي الصلب للحصويات الكلسية ($\rho_s=2.65\text{g}/\text{cm}^3$).
- **حصويات** $D_{\text{Max}}=19\text{mm}$ من مقالع حسياء بمعامل لوس أنجلوس للاهتراء منخفض نسبياً ($LA=19\%$) تم فيها استبعاد الأقطار التي تتجاوز 19mm لتوافق متطلبات الحصول على ببتون المرصوص بالدحي مخبرياً.
- **ماء للجيل** قابل للشرب.

يبدو من المنحنيات أدناه أن الحصويات المستخدمة جيدة التدرج وتغطي بشكل مقبول جميع مجالات الأقطار الحصوية من 0 حتى 19mm . ويبين الشكل (1) التدرج الحبي لجميع المواد الحصوية التي تم استخدامها في البحث والتي تتراوح أقطارها بين 0 و 19mm .

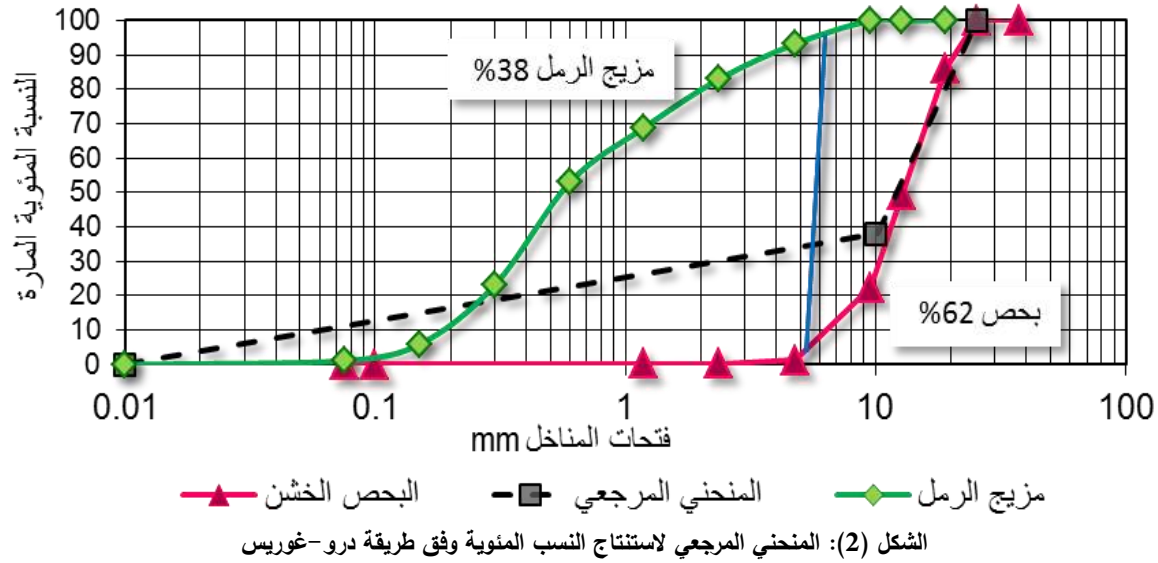


تم استخدام خليط من الرمل بنسبة 35% من الرمل الخشن إلى 65% من الرمل الناعم في الخلطات التجريبية وذلك لتحقيق معامل نعومة مناسب لخليط الرمل بجوار الـ $MF=2.3$.

2. تصميم الخلطة الأولية

اتبعنا في تصميم الخلطة الأولية طريقة درو-غوريس (Dreux-Gorisse) لتصميم الخلطات دون إضافة الفيلر وباستخدام حصويات قطرها الأعظمي $D_{\text{max}}=19\text{mm}$ وعيار للإسمنت قدره $250\text{Kg}/\text{m}^3$ يسمح بالحصول على ببتون بمقاومات مقبولة [7].

يبين الشكل (2) التدرج الحبي المرجعي المحسوب وفق (Dreux-Gorisse) والذي يعطي النسب المثلى لخليط البحص مع مزيج الرمل للحصول على أفضل اكتناز للببتون التقليدي.

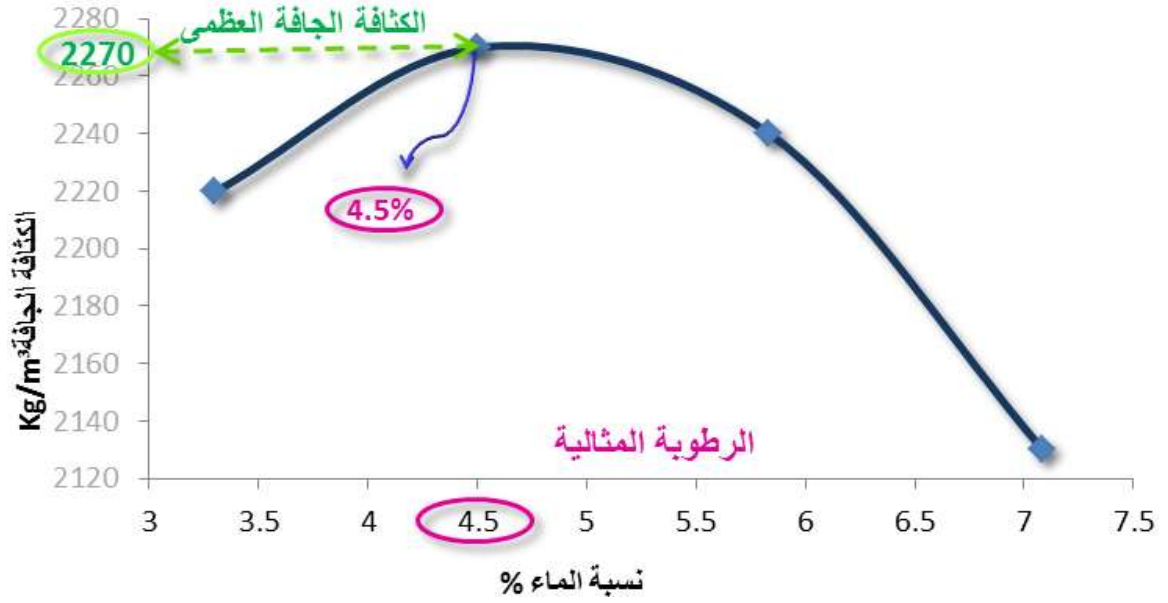


يظهر على الشكل (2) منحنيات التدرج الحبيبي لكل من البحص ومزيج الرمل، والمنحني الحبيبي المرجعي المرسوم وفق (Dreux-Gorisse). كما تحدد القطعة المستقيمة الواصلة بين النقطة الموافقة للمار 95% على منحنى التدرج الحبيبي لمزيج الرمل، والنقطة الموافقة للمار 5% على منحنى البحص، عند تقاطعها مع المنحني المرجعي نسب الخط المتلى والتي يبدو من الرسم أنها: 62% للبحص، و38% للرمل الممزوج بالنسب المذكورة سابقاً (35% من الرمل الخشن إلى 65% من الرمل الناعم).

ومتابعةً للتصميم، اعتمدنا عياراً للإسمنت وفق معطيات الدراسة المرجعية التي قمنا بها بحدود $C=250\text{kg/m}^3$ ، ومحتوى متغير من الفيلر يتراوح بين 50kg/m^3 و 150kg/m^3 ، ومحتوى هوائي يتلاءم مع البيتون المرصوص، أما نسبة الماء فقد تم تحديدها بحساب الكثافة الجافة القصوى للوصول للرطوبة المثالية وفق طريقة بروكتور المعدلة وذلك بمعرفة بعض خصائص المواد كالوزن النوعي، يبين الشكل (3) منحنى بروكتور للخلطة المرجعية بدون فيلر والجدول (1) يبين الرطوبة المثالية لكل خليط بعد رسم منحنى بروكتور.

الجدول (1): نسبة الماء (%) للخلطات الـ RCC الأربعة

الخليط	W/C	كمية الماء (Kg/cm ³)	كمية الإسمنت (Kg/cm ³)	الكثافة الجافة (Kg/cm ³)	محتوى الماء %
M0	0.432	108.0	250	2270	4.50
M50	0.437	109.2	250	2310	4.55
M100	0.442	110.4	250	2300	4.60
M150	0.480	120.0	250	2240	5.00



الشكل (3): منحني بروكتور للخلطة بدون إضافة فيلر

M0 هو الخليط المرجعي الذي لم يُضف له الفيلر وبالنسبة لبقية الخلطات يوضح الرقم الموجود جانب الخليط كمية الفيلر المضافة لمترا مكعب من الخليط.

يبين الجدول (2) النسب الوزنية للمواد الداخلة في تركيب الخلطة المرجعية بدون إضافة فيلر M0 وقد تم إدراج أوزان المواد اللازمة لصب عينات من هذه الخلطة المرجعية بدون إضافة فيلر بمحتوى الماء الأمثل بتطبيق العلاقات التالية:

$$1000 = VC + Vg + Vw + Vv$$

$$1000 = \frac{C}{\rho_c} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{w}{\rho_w} + V$$

حيث:

$$C=250 \text{ Kg/m}^3, \quad \rho_g=2620 \text{ Kg/m}^3, \quad \rho_c=3100 \text{ Kg/m}^3, \quad \rho_w=1000 \text{ Kg/m}^3, \quad V=15\text{L/m}^3$$

الجدول (2) : النسب الوزنية للمواد الداخلة في تركيب الخلطة المرجعية بدون إضافة فيلر M0

W/(C+F)	W/C	وزن جمي	هواء L/m ³	رمل ناعم (Kg/m ³)	رمل خشن (Kg/m ³)	فيلر (Kg/m ³)	بحص (Kg/m ³)	كمية الماء (Kg/m ³)	إسمنت (Kg/m ³)
0.432	0.432	2441	15	412	504	0	1165	108	250

كما يبين الجدول (3) مواصفات البيتون الناتج للخلطة المرجعية بدون إضافة فيلر M0 في عمر 28 يوم وذلك لإظهار مدى اقتراب هذا التصميم من حيث المواصفات من البيتون المرصوص بالدحي من حيث قبول المقاومة على الضغط البسيط RC₂₈.

تمثل قيم المقاومات المدونة في الجدول وسطي ثلاث عينات من مكعبات أبعادها 15*15*15cm، أما قياس المقاومات في الأعمار المبكرة فيعود للتحقق من إمكانية استثمار الطريق بأقل عمر ممكن.

الجدول (3): المقاومة المتوسطة على الضغط البسيط لخلطة بدون فيلر

العمر	المقاومة المكعبية المتوسطة	المقاومة الأسطوانية المتوسطة R _C
day	kg/cm ²	kg/cm ²
2	72	57
7	285	228
28	347	278

3. صناعة العينات

بعد الانتهاء من التصميم النهائي للخلطات وبمحتوى رطوبة أمثل كما تم شرحه مفصلاً في الفقرات السابقة، ولصناعة العينات من هذا الخليط تم استخدام نموذج تعبئة قابل للضغط بالمكبس الهيدروليكي، ملئ القالب على خمس طبقات وتم رص المزيج بالرج أولاً والضغط لاحقاً للوصول لدرجة الرص المطلوبة بألية الرج- الضغط -Vibro- compaction.

أما القوالب التي استخدمت في الصب فهي القوالب المستخدمة في صناعة عينات البيتون التقليدي أبعادها 15×15×15cm وبالتالي للوصول للكثافة المطلوبة فان ذلك سيتطلب استخدام كمية حجمها الظاهري يفوق الحجم الحقيقي للمكعب باعتبار أن الخليط يحتل حجماً أكبر عندما يكون مخلخلاً. لذلك تم صناعة قالب معدني يشكل امتداداً طويلاً للأعلى للقالب الذي سنستخدمه لصب العينات. يسمح هذا الامتداد بتجنب ضياع جزء من البيتون أثناء الضغط. يبين الشكل (4) القالب الخاص بصب العينات ورسها مع ملحقاته من محاور التثبيت والبراغي والقمع.



الشكل (4) القالب مع امتداده الطولي

ومن أجل الوصول لأقصى رص للعينة في المختبر تم استخدام طريقة Vibro-compaction حيث تتضمن مجموعة من الأدوات منها استخدام الطاولة الاهتزازية وقضيب لدك طبقات الخليط أثناء وضعه بالقالب خلال هزه على الطاولة الاهتزازية. ثم تطبيق حمولة ضغط على المكبس الهيدروليكي تستمر في الازدياد حتى تأمين امتلاء القالب.

6. مراحل صناعة العينات

تبين الأشكال من (6) إلى (9) مراحل صناعة عينات البيتون المرصوص بالدحي مخبرياً بدءاً من الخلط وانتهاءً بفك القالب وهي مرتبة كمايلي:

a. توضع الأوزان المحسوبة مع الماء في حوض الخلط وتخلط حتى الوصول لحالة التجانس. كما يظهر في الشكل (6):



الشكل (6): وضع المواد وخلطها في حوض الخلط

b. توزن كمية من الخلطة ملائمة لملء القالب بشكل كامل بعد الرص.
c. يوضع القالب على الطاولة الاهتزازية أثناء ملئه على طبقات مع الدك لكل طبقة بالقضيب كما هو موضح في الشكل (7):



الشكل (7): آلية الإملء الاهتزاز - الضغط للعينة أثناء وضعها على الطاولة الاهتزازية ودمكها بالقضيب المعدني

d. يركب امتداد القالب المعدني لاحتواء باقي الكمية ثم يوضع القالب مع امتداده على المكبس بحيث تصبح العينة محتواة بشكل كامل ضمن القالب بعد رصها وبهذا يكون قد تم تحقيق الكثافة العظمى المحسوبة نظرياً لهذا الحجم المحدد أي لقالب $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$. ثم يتم تطبيق ضغط حتى الوصول إلى γ العظمى لإملء القالب.



الشكل (8) وضع القالب مع امتداده على المكبس الهيدروليكي وتطبيق الضغط اللازم للإملاء

e. تترك العينات بعد انتهاء الرص في القالب في رطوبة نسبية مرتفعة أكبر من 90% ساعة ثم يفك القالب وتوضع العينة في الماء



الشكل (9) العينة بعد 24 ساعة من الصب وقبل فك القالب عنها

f. اختبار العينات على الضغط البسيط بالأعمار 2, 7, 28 day. بلغ عدد العينات المكعبية المحضرة 72 عينة من أجل الخلطات (M0)، (M50)، (M100)، (M150) بحسب محتواها من الفيلر لدراسة المقاومة على الضغط البسيط وتطورها مع الزمن بتأثير إضافة الفيلر منها 18 عينة تمت صناعتها بدون فيلر وباقي العينات مع فيلر. يبين الجدول (5) قيم المقاومات المتوسطة للعينات على الضغط البسيط.

الجدول (5): المقاومة المتوسطة على الضغط البسيط لخلطة بدون فيلر

المقاومة الأسطوانية المتوسطة	المقاومة المكعبية المتوسطة	اليوم
kg/cm ²	kg/cm ²	
57	72	2
228	285	7
278	347	28

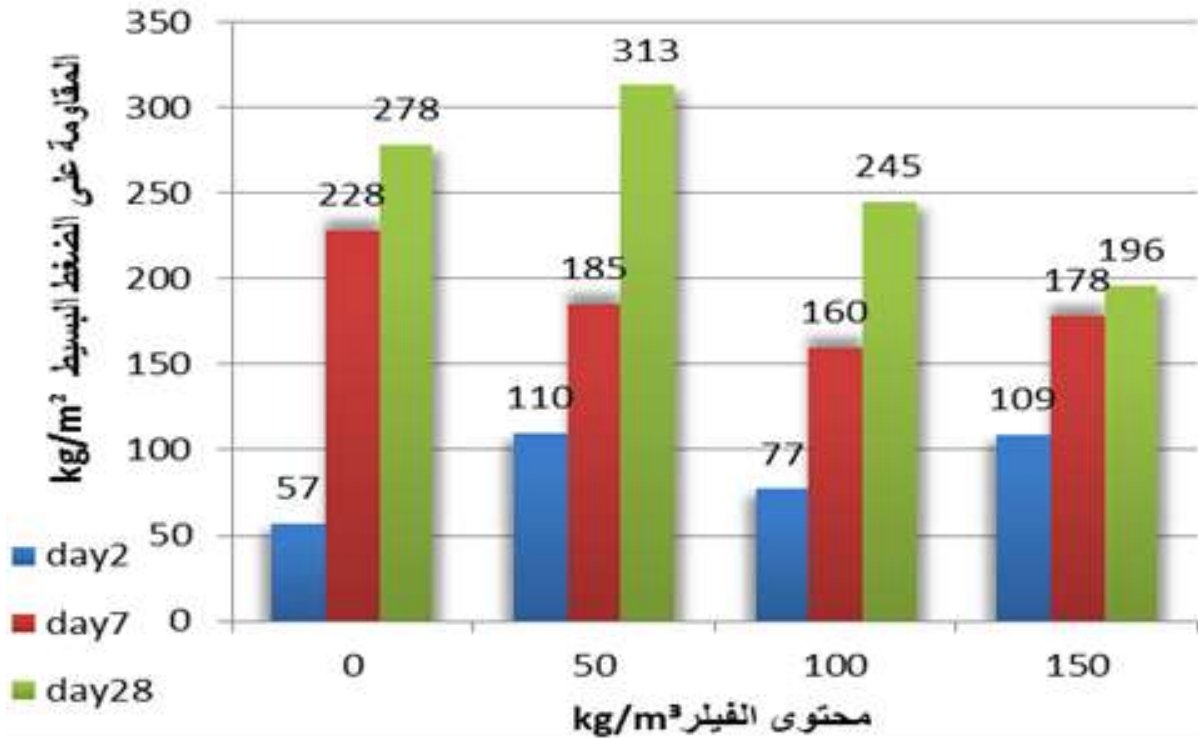
النتائج والمناقشة:

1- تأثير إضافة الفيلر على الخواص الميكانيكية للببتون المرصوص بالدحي

تم اختبار العينات على الضغط البسيط بعمر يومين وسبع أيام وثمان وعشرين يوماً. وأخذ متوسط المقاومة. أما قياس المقامات في الأعمار المبكرة فيعود للتحقق من إمكانية استثمار الطريق بأقل عمر ممكن. يبين الجدول (6) نتائج المقامات على الضغط البسيط لجميع الخلطات مع تمثيلها بيانياً في الشكل (9):

الجدول (6): المقاومة على الضغط البسيط R_c (Kg/m^2) لجميع الخلطات

R_{c28} kg/cm^2	R_{c7} kg/cm^2	R_{c2} kg/cm^2	رمز الخلطة	
278	228	57	M0	خلطة بدون فيلر
313	185	110	M50	بإضافة فيلر $50 Kg/m^3$
245	160	77	M100	بإضافة فيلر $100 Kg/m^3$
196	178	109	M150	بإضافة فيلر $150 Kg/m^3$

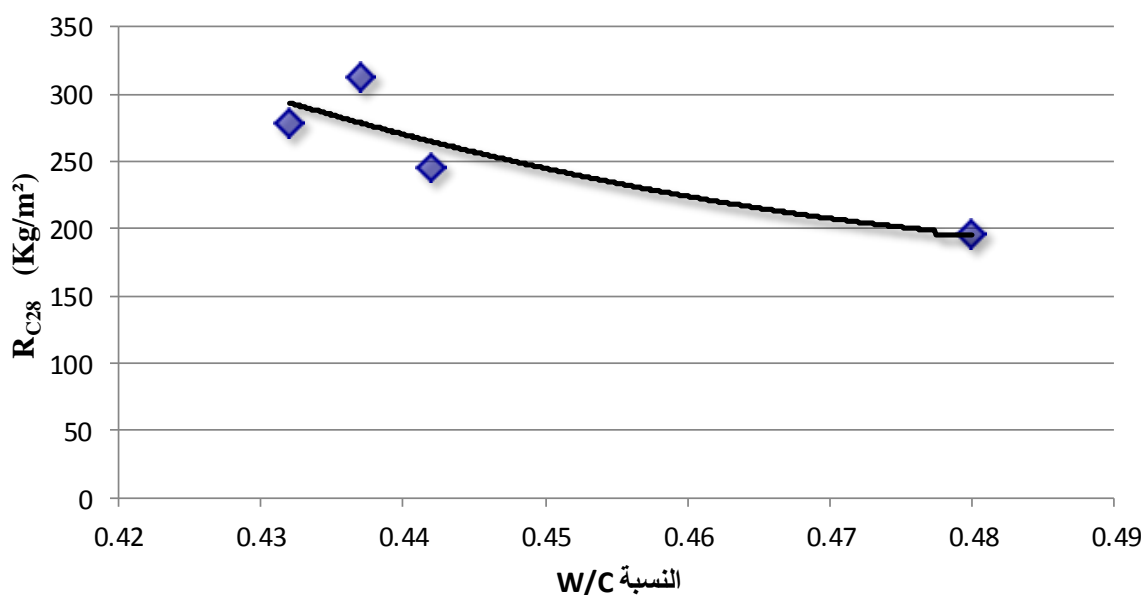


الشكل (9) تأثير إضافة الفيلر على المقاومة على الضغط البسيط بأعمار مختلفة لجميع الخلطات

يظهر من الشكل (9) أن المحتوى المثالي من الفيلر في خلطات الببتون المرصوص بالدحي كان بجوار القيمة 50Kg/m^3 . يبدو ذلك اقتصادياً إذا علمنا أن كلفة إنتاج الفيلر هي أقل بكثير من كلفة إنتاج الإسمنت وإذا ما أخذنا بعين الاعتبار حاجة الببتون المرصوص بالدحي للمواد الناعمة. تبدو هذه النسبة المثالية للفيلر محققة عند الأعمار 2 و 7 أي في الأعمار المبكرة وهو ما يهيم مصممي الطرق عند الحاجة لاستثمارها سريعاً.

2- تأثير النسبة W/C على المقاومة على الضغط البسيط

عند معايرة محتوى الماء في الخلطات اعتماداً على اختبار بروكتور تبين أن النسبة W/C تختلف بشكل طفيف عند كل محتوى من الفيلر وتتراوح قيمتها بين $W/C=0.43-0.48$. يظهر المنحني على الشكل (10) العلاقة بين النسبة W/C والمقاومة على الضغط البسيط والتي تتغير من أدنى قيمة لها وقدرها 196kg/cm^2 عند النسبة 0.48 إلى أعلى قيمة لها بجوار النسبة 0.43 وهي 313kg/cm^2 . ما يدل أن هذا الفرق الطفيف في محتوى الماء أحدث فرقاً كبيراً في المقاومة وهو ما يتوافق مع ما يبديه الببتون التقليدي من تغير في المقاومة عندما تتغير النسبة W/C، كما يمكن الاستفادة من هذه النتيجة بالتدقيق على الحد الأدنى من الماء الذي سيضاف للببتون المرصوص بالدحي حرصاً على المقومات العالية المطلوبة له. يظهر الشكل (10) المقاومة على الضغط البسيط في عمر 28 يوماً مقابل النسبة W/C.



الشكل (10): المقاومة على الضغط البسيط Rc28 بدلالة النسبة W/C

يعطي الجدول (7) قيم الرطوبة المثالية % والكثافة الجافة مقدرة بـ Kg/m^3 بالإضافة لكمية الماء وكمية الإسمنت مقدرة بـ Kg/m^3 للخلطات الأربعة.

الجدول (7) الرطوبة المثالية (%) لخلطات الـ RCC الأربعة

الخليط	W/C	كمية الماء Kg/m ³	كمية الإسمنت Kg/m ³	الكثافة الجافة Kg/m ³	محتوى الماء %
M0	0.432	108.0	250	2270	4.50
M50	0.437	109.2	250	2310	4.55
M100	0.442	110.4	250	2300	4.60
M150	0.480	120.0	250	2240	5.00

يعطي الجدول (8) قيم المقاومة على الضغط البسيط والنسبة W/C للخلطات الأربعة:

الجدول (8) المقاومة على الضغط البسيط والنسبة W/C للخلطات الأربعة

الخليط	W/C	Filler (kg/m ³)	Rc2 (kg/cm ²)	Rc7(kg/cm ²)	Rc28(kg/cm ²)
M0	0.432	0	57	228	278
M50	0.437	50	110	185	313
M100	0.442	100	77	160	245
M150	0.480	150	109	178	196

3- تأثير إضافة الفيلر على تطور المقاومة مع الزمن

يبدو السؤال عن أقرب وقت لفتح الطرق المرصوفة بالـ RCC أمام المرور سؤالاً هاماً لا بد من الإجابة عنه، إن إحدى فوائد استخدام الـ RCC هي القدرة على تحمل المرور على الرصف بعد وقت قصير من الإنشاء، والسبب يعود لعملية الرص التي تؤدي لاحتكاك الجزيئات المحصورة كما أن ترابط الحصى في الخليط الجاف بشكل وثيق، يسمح بعبور العربات الخفيفة فوق الـ RCC بعد وقت قصير من الإنشاء بدون أن تؤذيه أو تلحق ضرراً به أو تؤدي إلى تغير توضع المواد التي تكوّن هذا البيتون. ومع ذلك فإن عبور العربات الخفيفة لا ينصح به إلا بعد أن يحقق هذا البيتون متطلبات المقاومة على الضغط البسيط والتي تتراوح بين (140-175 kg/cm²)، لذلك فإن دراسة تطور المقاومة مع الزمن سيعطي فكرة واضحة عن إمكانية استثمار الطريق في العمر المبكر والعمر البعيد، وهو ما استدعى اختبار **المقاومة على الضغط البسيط** لعينات البيتون المرصوص بالدحي RCC بعمر 2 و 7 و 28 يوماً. يبين الجدول (11) المقاومات على الضغط البسيط بهذه الأعمار لجميع الخلطات.

اقتصر هذا البحث على تكنولوجيا البيتون المرصوص بالدحي، دون أن نهمل ضرورة اختبار الطرق المنفذة

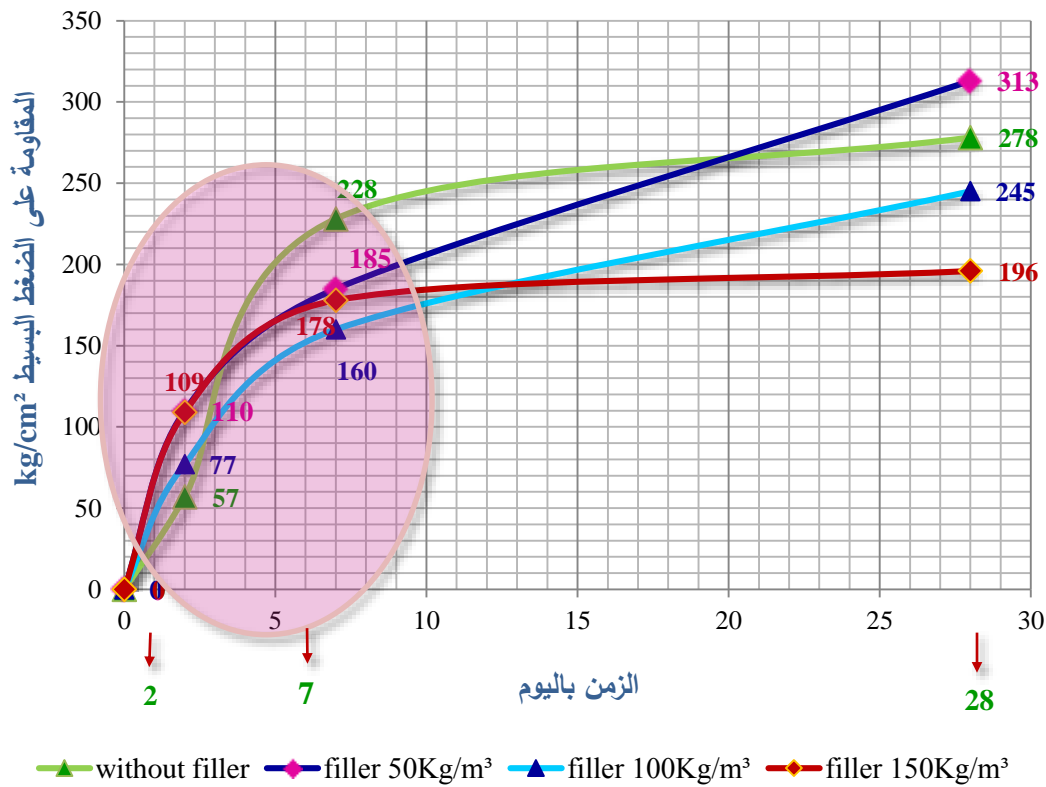
من هذا البيتون، و تأثير ديمومتها بتغير خصائصه، و هو ما سيتم لاحقاً في بحث قادم.

وللوقوف على تأثير إضافة الفيلر على سرعة تطور المقاومة مع الزمن تم رسم منحنيات تطور المقاومة مع الزمن لكل خلطة.

لدراسة منحنى تطور المقاومة مع الزمن تم تقسيم هذا المنحنى المدروس إلى ثلاثة أقسام بميول مختلفة اقترحنا تسميتها VR1، VR2، VR3، تتوافق مع الشرائح العمرية من (0-2) و (2-7) و (7-28) يوماً على التوالي. ويبين الشكل (11) منحنيات تطور المقاومة مع الزمن لكل خلطة. كما يبين الشكل (11) سرعة تطور المقاومة مع الزمن للعينات في عمر 2 و 7 و 28 يوماً. وتم إدراج جميع القيم الناتجة في الجدول (10):

الجدول (10): سرعة تطور المقاومة مع الزمن لجميع الخلطات

كمية الفيلر المضافة	VR1	VR2	VR3
	(kg/cm ²)/day		
بدون فيلر	28.5	34.2	2.4
50kg/m ³	55.0	15.0	6.1
100kg/m ³	38.5	16.5	4.1
150kg/m ³	54.2	13.8	0.9



الشكل (11): منحنيات تطور المقاومة مع الزمن لجميع الخلطات

أما ميل كل جزء من أجزاء المنحني والتي سميناها VR1- VR2- VR3 فتحسب (بحسب موقع كل جزء من المنحني) كالتالي:

$$R_1 = \frac{(R_{C2} - R_{C0})}{2}$$

حيث

VR1- سرعة تطور المقاومة للفترة الأولى من المنحني

R_{C0} - المقاومة عند العمر صفر يوم (وهي مقاومة معدومة)

R_{C2} - المقاومة في عمر 2 يوم

$$V_{R2} = \frac{(R_{C7} - R_{C2})}{5}$$

حيث

VR_2 - سرعة تطور المقاومة للفترة الثانية من المنحني

R_{C2} - المقاومة في عمر 2 يوم

R_{C7} - المقاومة في عمر 7 يوم

$$V_{R3} = \frac{(R_{C28} - R_{C7})}{21}$$

حيث

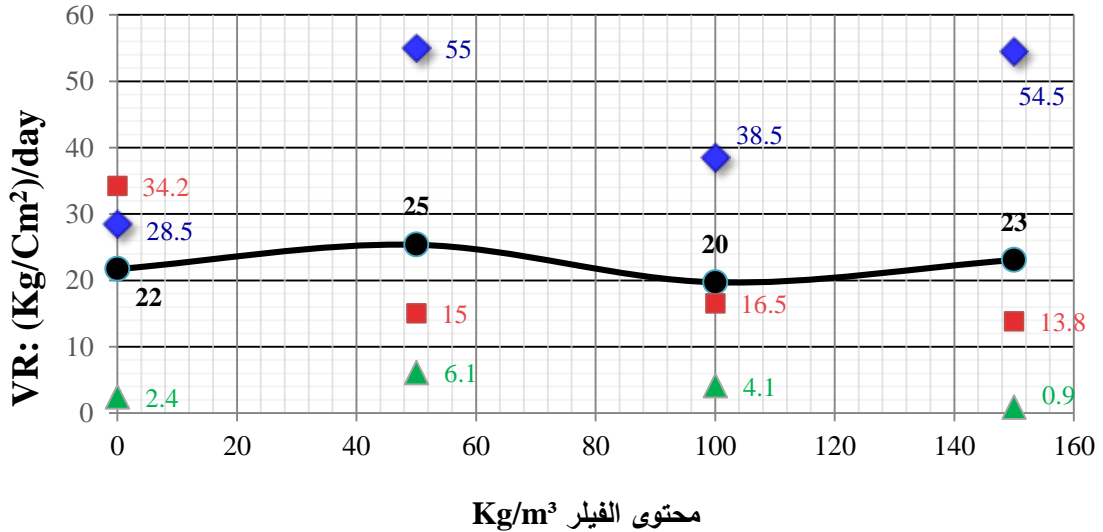
VR_2 - سرعة تطور المقاومة للفترة الثالثة من المنحني

R_{C7} - المقاومة في عمر 7 يوم

R_{C28} - المقاومة في عمر 28 يوم

إن وسطي الميل للشرائح العمرية الثلاثة (0-2) و (2-7) و (7-28) لكل محتوى من الفيلر هو \overline{VR}_{50} , \overline{VR}_0 و \overline{VR}_{100} , \overline{VR}_{150} ويظهر الشكل (12) وسطي تطور سرعة المقاومة:

VR سرعة تطور المقاومة مع الزمن



◆ ΔR1 ■ ΔR2 ▲ ΔR3 ● السرعة الوسطى لتطور المقاومة

الشكل (12) سرعة تطور المقاومة مع الزمن للعينات

تأتي أهمية دراسة تأثير الفيلر على سرعة تطور المقاومة مع الزمن من خلال الحاجة إلى الاستثمار السريع للطرق البيتونية المرصوفة باستخدام البيتون المرصوص بالدحي أسوة بالطرق المرصوفة بالمجبول الإسفلتي. دون أن نهمل ضرورة اختبار الطرق المنفذة من هذا البيتون، و تأثير احتكاكها و ديمومتها بتغير خصائصه، و هو ما سيتم لاحقاً في بحث قادم.

يبدو من المخطط على الشكل (11)، والذي يعطي تغير هذه السرعة VR1 مع المحتوى من الفيلر 50kg/m^3 هو الأفضل، والذي يحقق التطور الأسرع للمقاومة بالنسبة للشريحة العمرية الأولى (0-2) يوم، ويفارق جيد عن النسب الأخرى كما تبدو سرعة التطور الوسطى للمقاومة \overline{VR} والممثلة بالمنحني المستمر الأسود على الشكل (12) هي الأفضل عند المحتوى ذاته من الفيلر.

تشكل هذه النتيجة داعماً جيداً لاستخدام الفيلر بنسب محددة في البيتون المرصوص بالدحي إذ تدعم ما تم التوصل إليه في الفقرات السابقة من ملاءمة المحتوى 50 kg/m^3 للاستخدام في خلطات البيتون المرصوص بالدحي. مما سبق نجد أنه كان لإضافة الفيلر بكمية 50 kg/m^3 أعلى سرعة لتطور المقاومة في العمر المبكر 2 يوم حيث أعطت VR1 قيمة تعادل $55\text{ kg/cm}^2/\text{day}$ ، بينما كانت أعلى سرعة لتطور المقاومة في عمر 7 أيام للخلطة التي لم يضاف لها الفيلر، وفي عمر 28 يوم أعطى الخليط الذي أضيف له الفيلر بكمية 50 kg/m^3 أعلى سرعة لتطور المقاومة في العمر البعيد.

يلاحظ من هذه المخططات، أن منحنى تطور المقاومة بالنسبة للخلطة التي لم يضاف لها فيلر أظهر تطوراً أسرع من الخلطات الأخرى، إذ أن إضافة الفيلر أدت إلى إبطاء عملية اكتساب المقاومة قليلاً. أما المقاومة الأعلى بالعمر البعيد فكانت للعيار 50 Kg/m^3 من الفيلر. تقود هذه المناقشة لملاحظة التأثير الإيجابي لإضافة الفيلر بنسبة محددة على المقاومة على الضغط البسيط وكذلك على تسريع اكتساب الخلطة للمقاومة مع الزمن.

الجدول (11) المقاومة على الضغط البسيط من أجل 2 و7 و28 يوم لجميع الخلطات

R _{C28} Kg/cm ²	R _{C7} Kg/cm ²	R _{C2} Kg/cm ²	الخليط	
278	228	57	M0	خلطة بدون فيلر
313	185	110	M50	بإضافة فيلر 50 Kg/m^3
245	160	77	M100	بإضافة فيلر 100 Kg/m^3
196	178	109	M150	بإضافة فيلر 150 Kg/m^3

الاستنتاجات والتوصيات:

بعد استعراض النتائج ومناقشتها من خلال الجداول والمنحنيات والتحليل الذي تم تعديله توصلنا إلى النقاط التالية لنتائج هامة للبحث:

1. قمنا بابتكار طريقة مخبرية ملائمة لصناعة عينات البيتون المرصوص بالدحي تعتمد مبدأ الرج بالاهتزاز والرص الهيدروليكي والتي تعطي أقصى كثافة للوصول لدرجة الرص المطلوبة لحصول على مقاومات جيدة.

2. تمت الاستعاضة عن عيارات الإسمنت العالية اللازمة لتحقيق المقاومات المقبولة بعيارات منخفضة $C=250\text{Kg/m}^3$ وفق توصيات صناعة هذا البيتون، والتعويض عن النواعم بالفيلر الكلسي المحلي رخيص الثمن، حيث أن استخدام مواد مألوفة ناعمة في الخلطة يعطي اكتنازاً وكثافة لملء الفراغات بين الحصىات وبالتالي زيادة المقاومة لهذا البيتون الذي يتميز بانخفاض نسبة الإسمنت الداخلة في مكوناته وبالتالي يقوم الفيلر بتعويض المقاومة ورفعها للتعويض عن انخفاض نسبة الإسمنت لجعل المنشأ يحقق وفراً اقتصادياً جيداً.
3. قمنا بتحديد النسبة المثلى لإضافة الفيلر والتي حققت ثلاثة معايير هامة:

$R_{C2}=110\text{Kg/cm}^2$	• مقاومة جيدة في العمر المبكر
$R_{C28}=313\text{Kg/cm}^2$	• مقاومة جيدة في العمر البعيد
$VR>50(\text{Kg/cm}^2)/\text{day}$	• سرعة تطور مقاومة مقبولة

- حيث يمكن القول أن إضافة الفيلر بنسب معينة على الخلطة البيتونية أثراً إيجابياً على سرعة تطور المقاومة مع الزمن، باعتبار أن إحدى فوائد استخدام الـ RCC هي القدرة على تحمل المرور على الرصف بعد وقت قصير من الإنشاء وهذا يشجع على إجراء البحوث المناسبة على الفيلر كإضافة جديدة للبيتون المرصوص بالدحي.
4. نقترح متابعة الدراسة لإيجاد العلاقة بين طاقة رص العينات والمقاومة على الضغط البسيط.
5. نقترح أن يتم دراسة استخدام إضافات أخرى موجودة لدينا ككفايات قص الرخام والغرانيت والرماد المتطاير.
6. نقترح المتابعة في دراسة الخصائص الأخرى للبيتون المرصوص بالدحي كدراسة التشوه مع الزمن وتأثيرها بفقدان المقاومة.
7. إطلاق أبحاث أخرى خاصة باستخدام الحصىات المدورة في صناعة البيتون المرصوص بالدحي.
8. نقترح أن تتوسع البارامترات المدروسة لاحقاً بحيث تشمل عيار الإسمنت في الخلطة، شكل الحصىات، الإضافات الصلبة المستخدمة، وغيرها من البارامترات.

المراجع:

1. Robert W. Piggott, P.E., March, 1999, Portland Cement Association, *Roller Compacted Concrete Pavements –A Study of Long Term Performance-“Research & Development”* RP366.01P.
2. Anderson, R., *Roller Compacted Concrete Pavements Physical Properties* (Belagningar av valtbetongfysikaliskaegenskaper), CBI Report No. Ra 3:86, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1986.
3. McCormick, W. N., Jr., *Engineer Technical Letter* 1110-1-126, Chief, Engineering Division, Directorate of Engineering and Construction, Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 1985.
4. Canadian Portland Cement Association (CPCA), *Suggested Specification for Roller Compacted Concrete Paving for Municipal and Industrial Applications*, CP014.01P, 1995.05.26.

5. Aggoun, S. , KHEIRBEK, A. ,KADRI, E. H. , DUVAL, R. *Study of flowability of Self-compacting Concrete*, 1st North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC), November 12-13, 2002. Evanston, Illinois (USA). pp.235-240.

6. ACI, 1995, —State-of-the-Art Report on *Roller-Compacted Concrete Pavements*, ACI 325.10R-95 (Reapproved 2001), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 31 pages.

7. Brian Forbes, RCC– New Developments and Innovations Brazilian International Roller Compacted Concrete (RCC) Symposium, Salvador, Brazil, 7Sept. 2008

8. ASTM Standards, American Society for Testing and Materials (ASTM) International.

9. (ACI Committee 207, 1999) . “*Compaction of Roller Compacted Concrete.*” Committee 207, Farmington Hills, MI.

10. ASTM C 39. (2002). “*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.*”

11. الإسمنت، التركيب، المواصفات. هيئة المواصفات والمقاييس العربية السورية، S.N.S1887، دمشق،

1997، 15، طرائق اختبار الإسمنت، طريقة تحديد النعومة. هيئة المواصفات والمقاييس العربية السورية،

S.N.S1673، دمشق، 1996، صنف الإسمنت. هيئة المواصفات والمقاييس العربية السورية، S.N.S1674،

دمشق، 1996.