البنية المثلى للوسط الحبي مع وجود مادة رابطة
تطبيق على الخلطة البيتونية

الدكتور عفيف رحمة*

الملخص

تركز اهتمام الدراسات الهندسية في العقود الثلاثة الأخيرة، على تحسين مقاومة البيتون للمؤثرات الخارجية التي تسهم في تخريبه وإضعاف عمره الاستثماري. ووفق هذا الاهتمام توجهت البحوث لتطوير مواصفات البيتون وزيادة ديمومته، سمة أجمعت مجمل البحوث على علاقتها بكثافة الحصويات وبنيتها الحبية.

ضمن هذا الإطار وبناء على دراسة تحليلية، عملنا على وضع نموذج رياضي لصياغة هذه البنية الحبية وفق مواصفات فيزيائية وميكانيكية محددة، كما عملنا على إدراج هذا النموذج في نظام مقاربة رقمية يساعد على صياغة البنية المثلى المتوافقة مع المواصفات المطلوبة.

اعتمدنا في عملنا على حصويات مشابهة لتلك الشائعة الاستخدام محلياً كما استخدمنا مثل هذه الحصويات في عملية التحقق من النموذج المقترح. أكدت النتائج صحة الفرضيات التي انطلقنا منها والجدوى العملية للنموذج الرياضي المقترح.

الكلمات المفتاحية: بنية حبية، نمذجة، بيتون، تقريب أمثل

* أستاذ، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق

1- الهدف من البحث

هدف البحث وضع أسس علمية جديدة لتشكيل بنية الوسط الحبي المفكك بما يتفق ووظيفته والغرض من تشكيله، ونجد في المجبول البيتوني أحد أهم التطبيقات، إذْ يؤدي التركيب الحبي دوراً مهماً في مرحلتيه: الحالة الرطبة والحالة الصلبة، ذلك أن للتركيب الحبي دوراً مهماً في المرحلة الرطبة التي يحكمها السلوك الهيدروليكي ومعايير التشغيل في حين يكون له الدور الأهم في تحديد مقاومة المادة بعد تصلبها.

ينقسم بحثنا بشكل عام إلى قسمين:

يعدّ هذا البحث جزءاً من دراسة شاملة تتناول التركيب الحبي والاحتياج المائي للخلطة البيتونية، وسنحاول في هذا البحث عرض رؤيتنا في تشكيل البنية الحبية وحين يكون لهذا الموضوع علاقة مع الاحتياج المائي فَسَيُشَارُ إلى ذلك بشكل موجز.

2- نظرة تاريخية

يتكون البيتون الإسمنتي من المواد الحصوية القاسية ومادة الإسمنت الرابطة التي تتصلب بعد هدرجتها لتعطي للخلطة البيتونية تماسكها وصلابتها. ومنذ ظهور هذه المادة حتى الآن محور أساس يحكم تكوين هذه الخلطة ويتلخص بعلاقة غير بسيطة نسعى من خلالها إلى تحديد نسب المواد الصلبة بحسب فئتها والمعايرة بين الاسمنت والماء بحيث تحقق شرطين اثنين: الصلابة والتشغيل.

شرطان متناقضان من حيث شروط تحقيقهما فالمقاومة تتطلب الحد الأدنى من الماء أمَّا التشغيل فقائم على زيادة هذه الكمية ناهيك عن دور الحصويات الخشنة والحصويات الناعمة والعلاقة بينهما في كلتا المرحلتين، وغيرها من الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

إن دخول الإضافات الكيميائية التي تساعد على إكساب هذه المادة المركبة السيولة واللذوجة اللازمة للتشغيل بالتزامن مع تخفيض كمية الماء لم يقلل من أهمية خصائص البنية الحبية المفككة التي ترتب العلاقة بين الماء والإسمنت من ناحية وكمية الإضافات الكيميائية بوظائفها المختلفة من ناحية أخرى.

ورغم وصول قناعة عدد من الباحثين إلى أن دراسة هذا الموضوع قد وصلت لحد الإشباع وأن العامل الأهم في هذا العصر هو توجيه الاهتمام نحو تحقيق الديمومة والمواصفات الجيدة لمقاومة الكبريتات والكلور وممانعة التقشر والانحلال السطحي والتفحم وغيرها [1]... إلا أن مجمل الدراسات التي أجريت على هذا الموضوع أقرت بأن أحد أهم العوامل الفاعلة في تحقيق هذا الهدف هو التقليل من الفراغ والمسامات والوصول إلى أعلى حالة تراص ممكن للحصويات [2]، وهذا يعود بنا من جديد لدراسة البنية الحبية لهذا الوسط الخليط .

3- مراجعة عامة لطرائق المعتمدة في تشكيل البنية الحبية للخلطة البيتونية

تعتمد أكثر طرائق تصميم الخلطات البيتونية على الربط بين الأوزان المختلفة للحصويات حسب قياسها الاسمي d بطريقة ما يسمى منحنى التحليل الحبي التراكمي، طريقة وضع أسسها فيري Férer [3] ثم وجدت شكلها النهائي بعلاقة بولومي Bolomey والتي انبثق عنها طرائق أخرى لا تختلف عنها إلا في صياغة الشكل النهائي لهذا

المنحني [4] وعلى هذا المبدأ تتفق المواصفات الفرنسية AFNOR والمواصفة الأميركية ASTM و ACI [5, 6, 7, 8, 9]

أمَّا طريقة تقييم جودة التراكيب الحبية للحصويات فتتم وفق ما عرفه إدواردز Edwards [11] بمعامل النعومة Finesse Modulus الذي يحسب من مساحة السطح المحصور فوق منحنى التحليل الحبي التراكمي في المستوي نصف اللوغاريتمي.

4- عيوب الطرائق المتبعة

يشوب هذه الطرائق مجموعة من العيوب منها الشكلية ومنها البنيوية، فمن ناحية الشكل كان مأخذنا الأول في أن هذه الطرائق تعتمد في بناء الخلطة البيتونية على المنهج الوصفي التخطيطي، طرائق مستحيلة الاستخدام في النظم الرقمية للحساب ونظم الإنتاج الحديثة التي تعتمد الأجهزة الرقمية في التوزين والإنتاج، ناهيك عن الوسائل الرقمية في مراقبة الجودة.

أمَّا المأخذ الثاني فيتلخص في تقييم النتائج وسلامة التكوين الحبي للمواد الصلبة واعتماده على ما يسمى بالحزم المسموحة للحصويات، مما يعني القبول نسبياً بعشوائية المعطيات.

أما الجوانب البنيوبة فنعرضها فيما يأتي:

4-1- التركيب الحبي الوزني التراكمي

تعتمد هذه الطريقة على الكثافة النوعية وتفترض أنها واحدة لجميع الحبيبات، فرضية تخالف الواقع إذْ نجد أنها تختلف من فئة إلى أخرى لاختلاف مصادرها أو اختلاف طبيعتها.

محلياً، نحصل عادة على الحبيبات ذات القياس الخشن (فولي 12-25 ملم) والمتوسط (عدسي 6-12 ملم) من تفجير ثم تكسير متتالٍ للكتل الصخرية القاسية ذات البنية الكلسية المتصلبة مثل: الكالسيت Calcite الفلدسباث Feldspath، الغنايس..Gneiss أمَّا الحبيبات صغيرة القياس (رمل الكسر 1-6 ملم crushed sand) فتأتي من نواتج فرز الحصويات الخشنة ومن التكسير المتتالي للصخور الأقل قساوة أو الصخور الضعيفة، وهذا ما يفسر وجود مواد غضارية أو سلتية نحدد نسبتها عملياً بطريقة المكافيء الرملي. نضيف إلى هذه الفئة من الحصويات رمل المزار (1ملم) Natural Sand أو Dune Sand المتوافر في حقول من المواد الرملية الرسوبية الناعمة التي يغلب السيليس على بنيتها الفلذية.

بالطبع عند دراستنا للبنية العامة للخلطة البيتونية لن نغفل اختلاف خصائص حبيبات الإسمنت التي تصنف في بعض الدراسات من المواد الصلبة الداخلة في التركيب الحصوي قبل مرحلة الهدرجة.

إن الاختلاف في الكثافة النوعية لهذه المواد الصلبة يجعلنا عند محاولتنا الوصول إلى أعلى كثافة ممكنة للحصويات نخطئ في تقديرنا لمساهمتها الحجمية الحقيقية في إملاء الفراغ وعلى هذا الخطأ في التقدير نقلل من مساهمة الإشغال الحجمي للرمل ورمل المزار بنحو 4-5% ونبالغ بمساهمة الإسمنت بنحو 12-13% حجماً.

نبيّن هذا الخطأ في التقدير تخطيطياً في الشكل 1 حيث نظهر التباين بين منحني التركيب الحبي الوزني ومنحنى التركيب الحجمي للمواد الحصوية المبين مواصفاتها في الجدول 1.

إن هذه المشكلة تصبح بالغة الأهمية عندما نسعى للحصول على بيتون ذي مقاومة عالية باستخدام حصويات قاسية وكثافة وزنية عالية مثل حجر الجابرو Gabro أو مثيلاته من الصخور وباستخدام الخبث الصناعي في البيتون الثقيل أو الخفيف مثل الفلين والخفان والستيريوبور والغضار المعالج حرارياً عند سعينا لصناعة البيتون الخفيف.

4-2- معيار النعومة

استخدم هذا المعيار في تصميم الخلطات البيتونية وحساب نسب الحصويات إلى بعضها بعضاً [12] كما استخدم في تقييم جودة الحصويات قبل التركيب وبعده مقارنة بقيم مرجعية حددت من قبل جمعية ASTM حسب القياس الاسمي الأعظم للحصويات ونجد على سبيل المثال قيمة 5-5.2 لحصويات الخلطة البيتونية ذات القياس الاسمي الأعظم 25 ملم، و 2.1-2.2 لرمل الكسر....إلخ.

المشكلة القائمة في هذا المعيار هي في دقة تعبيره عن طبيعة البنية الحبية ومن خلال الشكل (2) نجد أنه يمكن الوصول إلى قيمة واحدة لبنى حبية مختلفة (المنحنى المستمر A والمنحنى الثنائي المنقطع B).

سبب آخر للشك بجدوى هذا المعيار هو أن تعديلاً بسيطاً في نسب الحصويات الخشنة يمكن أن يغطي الزيادة الكبيرة في نسب الحصويات الناعمة (المنحنى C) تاركاً وفق القيم المرجعية المقترحة الانطباع بجودة عالية للحصويات.

5- البحث عن معايير جديدة لتشكيل البنية الحبية

إن الهدف الرئيس في دراستنا للبنية الحبية المفككة للخلطة البيتونية هي الوصول إلى أعلى كثافة ممكنة للحصويات الصلبة ضمن شروط التصميم والتشغيل المطلوبة ووفق هذا المنظور أجرينا مراجعة جذرية لمساهمة كل فئة من الحصويات في إشغال الفراغ الحجمي للخلطة البيتونية.

استخدمنا في مراجعتنا هذه فئات أربعاً من الحصويات مطابقة بمواصفاتها لتلك الشائعة الاستخدام محلياً أجرينا تحديد خصائصها الفيزيائية والميكانيكية وفق طرائق القياس المرجعية المعتمدة من قبل المعهد الأميركي للبيتون ACI. جعلنا هدف الاختبار إشغال واحدة الحجم (1000 لتر) بأعلى كثافة حجمية ممكنة من الحصويات ثم استكمال مل الفراغ بالإسمنت ومن ثم بالماء.

ووفق ما هو مبيّن في الجدول فقد تم إملاء الفراغ بالحصويات بعملية تسلسلية بدءاً من الحصويات الخشنة ثم المتوسطة فرمل الكسر فالرمل الطبيعي فالإسمنت فالماء، معتبرين أن حجم الإملاء مرتبط بشكل توزيع الحصويات فيما بينها ومدى إشغالها للفراغ وهو ما يمكن تمثيله وزنياً بالوزن الحجمي الظاهر المرتبط بشكل الحبيبات وحجمها والعوامل الفيزيائية المؤثرة في ترتيب الحبيبات وتطبقها على بعضها بعضاً.

بهذه الخطوات وصلنا إلى الكثافة الحجمية القصوى للحصويات بحسب أهميتها في توفير مقاومة عالية للبيتون مع افتراض أنه في كل خطوة تستطيع فئة الحبيبات الأصغر الحلول في الفراغ المتشكل بعد استقرار الحصويات الكبرى. ونلاحظ من الجدول (1) أن المادة الصلبة تشغل (نظرياً) نحو 95% من حجم الفراغ الكلي أمَّا الإسمنت والماء فيشغلان نحو 5% فقط.

في هذا التكوين توزعت الحصويات بنسبة 78%

للحصويات الخشنة والمتوسطة (<#4) و22% للحصويات الناعمة (>#4). أمَّا الوزن الحجمي الكلي للخلطة فكان مساوياً 2716 Kg/m3 مع W/C=28/62=0.45 مع الإشارة إلى أننا أهملنا في هذه الخوارزمية للبنية الفرضية للمواد البيتون وجود الهواء الحتمي في الخلطة الذي يتراوح عادة بين 2 و6% من الحجم الكلي حسب ما ورد في [7,8].

5 -1- تقييم الخلطة ومنحنى التحليل الحبي الحجمي

تجريبياً، تميزت هذه الخلطة بالقساوة ودرجة منخفضة من التشغيل إذْ لم يتجاوز هبوط مخروط ابرامز الواحد سنتيمتراً. ميكانيكياً، فسرنا هذه الظاهرة بصعوبة حركة الحصويات الخشنة والمتوسطة ودورانها وبالمساهمة الضعيفة للمواد الناعمة في تحديد قوام الخلطة.

لمعالجة هذه الظاهرة لجأنا إلى تخفيض نسبة الحصويات الخشنة والمتوسطة مما ساعد على خلق فراغ أكبر يعطي لهذه الحصويات حرية أكبر في الحركة والدوران. نفذت هذه العملية بالتعديل المتتالي لنسب الحصويات ولم تصبح النتائج مرضية إلا بعد اقتراب منحنى التحليل الحبي الحجمي من منحنى بولومي (الشكل 3). توافقت زيادة التشغيل مع تخفيض كمية الحصويات الخشنة والمتوسطة من نسبة 78% إلى 53.6% حجماً، أي بزيادة الفراغ بنسبة 30% تقريباً مع الإشارة إلى أن هذه النسب مرهونة بشكل الحصويات وتجانسها وتجانس أبعادها وخصائص سطوحها وطبيعة رؤوسها.

استخلصنا من هذه العملية ما يأتي:

- للوصول إلى خلطة ذات قابلية تشغيل جيدة يجب أن تشكل الحصويات الخشنة نسبة قريبة من 50% من الحجم العام للحصويات وهذا ما يتفق مع توصيات ACI.

- إن طريقة البناء الحجمي لحصويات الخلطة المنطلقة من مبدأ الكثافة الحجمية القصوى للحصويات ممكنة ضمن شروطها النسبية.

- يمكن تطوير هذه النتيجة ووضع نموذج رياضي حجمي لبناء التركيب الحبي للخلطة البيتونية بدلاً من التركيب الوزني وهي الخطوة الأهم لتلافي العيوب التي ذكرت فيما سبق ولمعالجة تصميم الخلطات التي تعتمد على مواد خفيفة لا تتمتع بالكثافة النوعية والكتلة الحجمية ذاتها.

6- تمثيل منحني التركيب الحبي الحجمي

اعتماداً على دراسة تحليلية لمختلف التصورات التي عرضناها فيما سبق وباعتماد التركيب الحبي الحجمي التراكمي استطعنا أن نضع معادلة قوة تمثل رياضياً هذه البنية، وتأخذ الشكل :

$$P\% = F.d^{-} \qquad (1)$$

إذْ F و g كما هو مبين في الشكل 3 مترابطان بعلاقة من نوع

$$g = R.F^{\frac{2}{3}} \qquad (2)$$

علماً بأن:

P% النسبة المئوية الحجمية التراكمية للحصويات المارة من المهز d

F معامل يرتبط بنسبة المار من المهزّ 200#

g معامل يرتبط بالقياس الأعظم للحصويات

R ثابت المعادلة

7 - نظام مقاربة رقمي

كما حددنا في أهداف بحثنا فقد أدمجنا هذا النموذج الرياضي في نظام متكامل للتصميم والمقاربة الرقمية لتحديد نسب الفئات الأربع للحصويات لتشكيل البنية الأمثل لحصويات الخلطة البيتونية بما يتفق والشروط الفنية التي يحددها مهندس التصمصم. تضمن هذا النظام:

1- قاعدة علاقات رياضية.
2- منحنيات التحليل الحبي للفئات الأربع للحصوية المستخدمة محلياً.
3- مكتبة رقمية من المعطيات اللازمة لعمليات الحساب والمقاربة.
4- لوحة اشتراطات التصميم.
5- أداة رياضية للمقاربة المثلى Optimization utility بحيث نحصل على قيم التوزيع المثلى بين الحصويات الموافقة لأعلى نسبة تراص ممكن للمواد الصلبة، ضمن شروط التصميم المحددة في لوحة اشتراطات التصميم.

8 - ثوابت الجودة ومراقبة التصميم

يأخذ مهندس الجودة على عاتقه معالجة عدد من القضايا المرتبطة بمواصفات الخلطة البيتونية والتي تتطلب أحياناً عدداً من القرارات الآنية كتعديل النسب التصميمية للحصويات بسبب خلل في مواصفاتها أو تعديل كمية الماء المستخدم لتحقيق القوام المطلوب. مهمة قد لا يكون من السهل تخطيها بسبب التزامات الإنتاج إلا أنها تتطلب فيما بعد المتابعة الفنية والعقدية لتحسين جودة هذه الحصويات وتوافقها مع دفتر الشروط الفنية الملازم لعقد التوريد.

ضمن هذا الإطار لا بد لمهندس الجودة من أداة سليمة تساعده على استقراء العيوب الممكن حصولها عند تنفيذ الخلطات البيتونة وسعياً لتوفيرها نضع صياغة لمعامل يسمح لنا الحكم على جودة فئات المواد الحصوية المستخدمة وجودة المركب الحبي الناتج.

تبيّن لنا من خلال التحليل الإحصائي علاقة ترابط خطي واضح بين السطح النوعي لكمية الحصويات الناعمة اصغر من 4.75 ملم (المهز 4#) والاحتياج المائي ولما كان الهدف المحوري من التصميم الوصول إلى خلطة ذات نسبة دنيا من الماء الكافي لتحقيق القوام المحدد بالمواصفة الفنية، عَدَدْنا هذا العامل أحد العوامل المدمجة في نظام التصميم الرقمي والمستخدمة في تقييم جودة البنية الحبية لحصويات الخلطة البيتونية. عبرنا عن هذا العامل بالعلاقة:

$$Kcs=(\Sigma W . Sa) \qquad (3)$$

W الوزن النسبي لصف الحصويات الناعمة <4# ويقدر بالكيلوغرام.

Sa (م2\كغ) السطح النوعي المائي لصف الحصويات ذات الوزن W معيار سبق أن استخدم من قبل بعض المصممين [13] في تحديد النسبة بين الحصويات الناعمة والحصويات الخشنة.

يساعد هذا العامل على تقييم جودة المركب الناتج كما ويعدُّ عاملاً موجهاً في عملية تعديل هذه البنية لتحقيق بنية أفضل تتوافق مع القوام المناسب للخلطة البيتونية.

9 - مثال تطبيقي

لاختبار مقترحاتنا في بناء التركيب الحبي الحجمي الأمثل للخلطة البيتونية ولتبيان قابلية استخدام ثابت الجودة ومراقبة التصميم في إطار نظام المقاربة الرقمي استخدمنا عينة من الفئات الأربع للحصويات المستخدمة في هذه الدراسة والمبيّن خصائصها في الجدول 1 ومنحنيات تركيبها الحبي الحجمي التراكمي في الشكل 4.

انطلقنا بعملية المقاربة الرقمية من منحنى نظري مرجعي رسم حسب العلاقة (1) من أجل نسبة 8% للحبيبات المارة من المهز 200# كانت قيمة ثابت الجودة والمراقبة لهذا المنحنى مساوية Kcs=98. وبتحديد ثلاثة شروط مختلفة للمقاربة توصلنا إلى ثلاث بنى مختلفة بيناها في الشكل (5) إذْ يتضح لنا أن التوزيع B هو الأقرب للمنحنى النظري المرجعي. وكان توزين الحصويات الموافق للحلول الثلاثة المبينة في الجدول3.

10 - الخلاصة

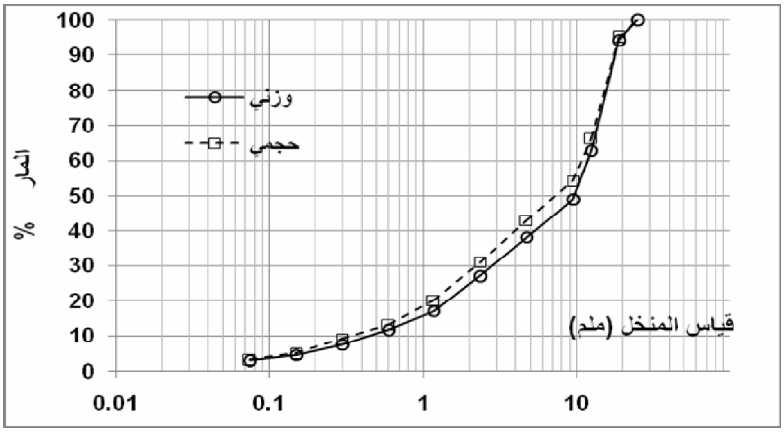
تؤثر التبدلات الطارئة لخصائص الحصويات الداخلة في الخلطة البيتونية في صحة نسب توزيعها وسلامة الصيغة الحبية التي بنيت على أساسها هذه الخلطة ومعالجة هذه التبدلات تحتاج إلى خبرة كبيرة تسمح باتخاذ الإجراءات اللازمة لمعالجة أثر هذه التبدلات خلال عملية الإنتاج.

يعدُّ نموذج تصميم الخلطات الذي اقترحنا صيغته أداة مهمة تساعد مهندس التصميم على وضع تركيب أمثل للخلطات البيتونية تأخذ بالحسبان صحة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحصويات، كما تساعده على التعامل مع المستجدات الطارئة ومع عقبات الإنتاج.

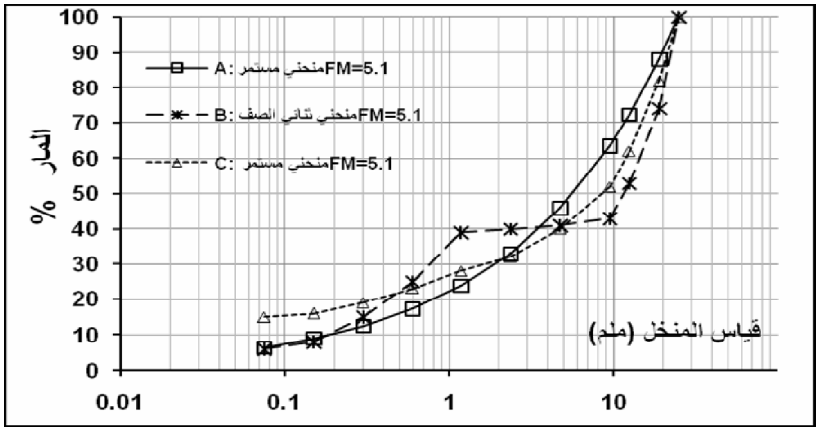
أظهرت التطبيقات التي بنيناها على سلامة النموذج وفاعليته في تقديم صيغة للخلطة البيتونية أقرب للمثالية فيما لو أخذنا بالحسبان عيوب المواد الحصوية الموردة للاستخدام، كما يسهم معيار الجودة في تقييم المنتج والمواد الحصوية دون إهمال لأهمية هذا المعيار في اتخاذ قرارات فنية ومالية وعقدية.

11 - شكر

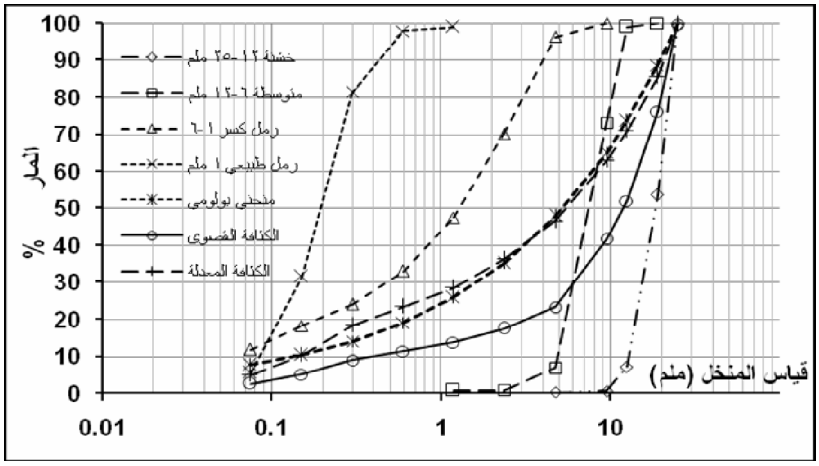
نفذت هذه الدراسة ضمن إطار مهمة البحث العلمي، ولا بدَّ من تقديم الشكر لجامعة دمشق واهتمامها بتطوير جودة التعليم وأسس البحث العلمي. كما لا بدَّ من تقديم الشكر لفريق GeM UMR 6183 في المدرسة المركزية للفنون والصنائع حيث تمت استضافتي وإعطائي الفرصة لإنهاء هذا البحث.



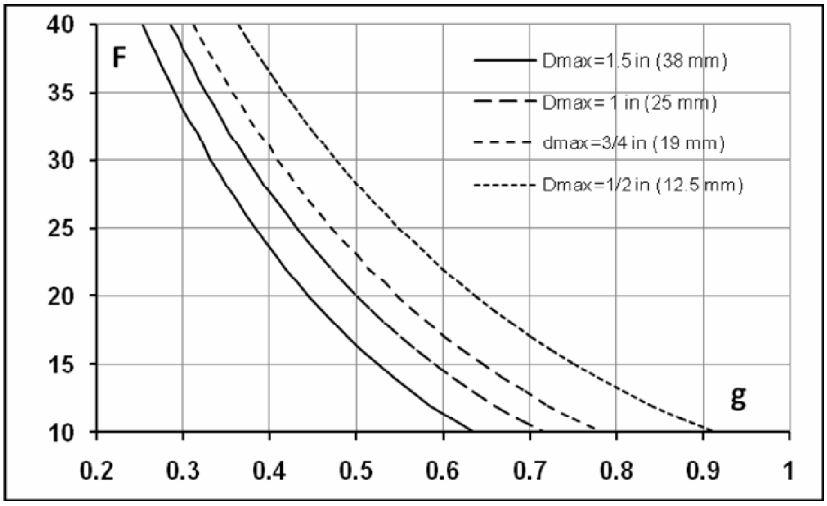
الشكل 1 - التباين بين منحنى التحليل الحبي التراكمي الوزني والحجمي



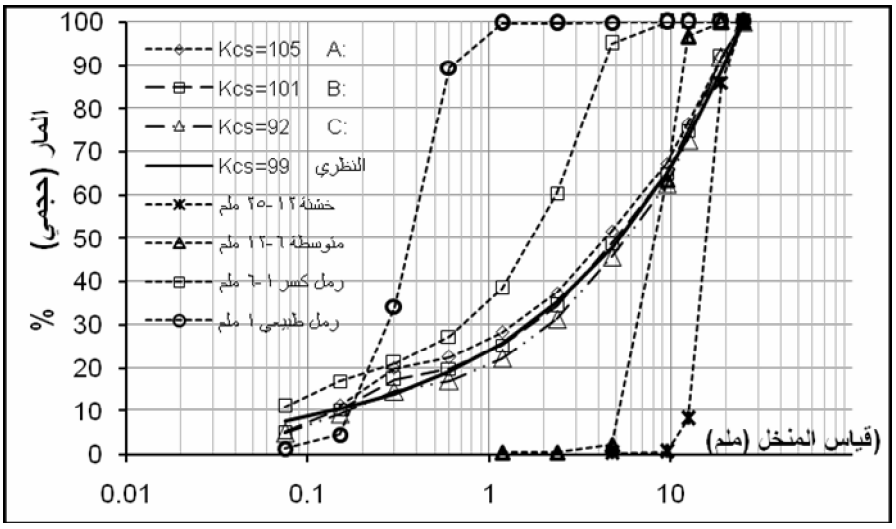
الشكل 2 - عامل النعومة لثلاثة منحنيات مختلفة



الشكل 3 - مقاربة المنحنى التراكمي الحجمي مع منحنى بولومي



الشكل 4 - العلاقة بين المتحولان F و g وفق القطر الاسمي الأعظم D_{max}



الشكل 5 - نتائج المقاربة مع المنحنى الافتراضي

الجدول 1- خوارزمية ترتيب مكونات البيتون

نوع الحصويات	خشنة 12-25 mm	متوسطة 6-12 mm	رمل كسر 1-6 mm	رمل طبيعي 1 mm	اسمنت	ماء
الكثافة النوعية Kg/m^3	2790	2780	2670	2650	3150	1000
الكتلة الحجمية الظاهر Kg/m^3	1350	1350	1600	1450	1300	1000
حجم الفراغ قبل الإملاء (L)	1000	516	265	106	48	28
حجم المادة في الخلطة (L)	483	250	160	58	20	28
وزن المادة في الخلطة (Kg)	1350	696	424	154	62	28

الجدول 2- نسب توزيع الحصويات بالكثافة العظمي والكثافة المعدلة

نوع الحصويات		خشنة 12-25 mm	متوسطة 6-12 mm	رمل كسر 1-6 mm	رمل طبيعي 1 mm
نسبة وزن الحصويات في الخلطة	عظمى	51.4%	26.5%	16.1%	5,8%
	مخفضة	31.1%	22.5%	34%	12.4%
نسبة المواد الخشنة والناعمة	عظمى	78%		22%	
	مخفضة	53.6%		46.4%	

الجدول 3- نسب توزيع الحصويات للتراكيب الثلاثة

	بحص خشن 12-25 mm	بحص متوسط 6-12 mm	رمل كسر 1-6 mm	رمل طبيعي 1 mm
التركيب A	25.4%	22.5%	40%	12.1%
التركيب B	27.3%	23.5%	40%	9.2%
التركيب C	29.4%	24.5%	39.7%	6.4%

المراجع

1. Mays G., Durability of concrete structures. Taylor & Francis 2003.
2. Rozière E., Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Nantes. N° ED 0367-3009. 2007
3. Férer, R., Sur la Compacité des mortier hydrauliques, Ann Ponts et Chaussée, Mem Doc, série 7, 4, 1892, pp. 5-164.
4. Dreux G., et Festa G., Nouveaux guide de béton et ses nouveaux constituants. 8eme ed. Eyrolles 1992
5. ACI Committee 340, ACI Design Handbook (ACI 340R-97), P-17(97), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997.
6. ASTM C 29 / C 29M – 97 (Reapproved 2003). « Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate ».
7. ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates.
8. ASTM C 94/C 94M – 03. « Standard Specification for Ready-Mixed Concrete ».
9. ATM C 494/ C 494 − 99. « Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete ».
10. NF EN 206-1 (2004) Béton – Partie 1: « Spécification, performance, production et conformité, AFNOR.
11. Edwards, L.N., « Proportioning the materials of mortars and concretes by surface area of aggregates » , Proc. ASTM, 18, Part II, pp. 235-302 (1918)
12. Day K.W., Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, 3nd Ed., Publ. Taylor & Francis, Sept. 2006.

Propovics S., The use of finesse modulus for the grading evaluation of aggregates for concrete. Mag. Conc. Res. 18, N° 56, pp. 131-40. 1966.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2010/3/22.