مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (35) العدد (8) 2013
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (35) No. (8) 2013

منهجية جديدة لتحسين خلطات البيتون ذاتي التوضع

الدكتور علي خيربك*
نوار ترك**

(تاريخ الإيداع 26 / 8 / 2013. قُبِل للنشر في 27/ 10 / 2013)

∇ ملخّص ∇

بدأ استخدام البيتون ذاتي التوضع وفق التسمية الفرنسية (Béton Auto-Plaçant BAP)، أو ذاتي الارتصاص وفق التسمية الإنكليزية (Self-Compacting Concrete SCC) في اليابان منذ العام 1980 بهدف تحسين خواص البيتون و رفع مستوى الأداء في قطاع البناء من خلال الصب المثالي و إنتاج بيتون بمواصفات أهمها عدم الحاجة إلى الرج، والقدرة على الملء المثالي لقالب الصب كثيف التسليح من خلال اكتسابه **للميوعة العالية** التي تساعده على الجريان تحت تأثير وزنه الذاتي، و **اللزوجة العالية** التي تحد من ظاهرة انفصال الحصويات. مع المحافظة على ظروف عمل بيئية ملائمة بالحد الأدنى من الضجيج [1]. تكمن الصعوبة في الوصول إلى تصميم جيد لخلطات البيتون ذاتي التوضع من خلال ضرورة تحقيق هذين الشرطين المتناقضين، الأمر الذي يحتاج الى خبرة عالية ، وذلك لعدم وجود منهجية واضحة للتصميم، والاعتماد على التجريب بشكل رئيسي.

تم في هذا البحث اقتراح منهجية جديدة قابلة للتطبيق لتصميم خلطات البيتون ذاتي التوضع و تحسين مواصفاتها، و ذلك بخطوات تعتمد على التحسين المتتالي لمواصفات البيتون المصمم، مع تقليل الاعتماد على الحكم الذاتي والخبرة الشخصية. ولمعرفة مدى كفاءة المنهجية المقترحة، تم التحقق منها تجريبياً على خلطات مصممة من مواد محلية، أعطت بعد اعتماد المنهجية المقترحة بيتوناً ذاتي التوضع يحقق الاشتراطات المطلوبة، كما يحقق المواصفات الميكانيكية اللازمة لاستخدامه في صب العناصر الإنشائية.

الكلمات المفتاحية: البيتون ذاتي التوضع، لزوجة البيتون، ميوعة البيتون، تصميم الخلطات.

* **أستاذ مساعد – قسم هندسة و إدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**
** **معيد – قسم هندسة و إدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (35) العدد (8) 2013
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (35) No. (8) 2013

Une nouvelle méthodologie pour l'amélioration des formulations du Béton Auto-Plaçant (BAP)

Dr. Ali KHEIRBEK*
Nawar TURK**

(Déposé le 26 / 8 / 2013 . Accepté 27/10/2013)

∇ Résumé ∇

Les Bétons Auto-Plaçants (BAP, ou SCC, en anglais, pour Self-Compacting Concrete) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte sans vibration, dans des zones fortement ferraillées, avec un béton de qualité sans ségrégation, et de diminuer les nuisances sonores [1].

La conception d'une meilleure formulation de BAP exige une connaissance profonde, ainsi qu'une forte expérience vue la contradiction des performances demandées (fluidité et viscosité).

Cet article propose une nouvelle méthodologie pour l'amélioration des formulations du Béton Auto-plaçant (BAP), avec des étapes bien définis qui consistent à améliorer progressivement les caractéristiques du BAP sujet de formulation, et ne nécessitent pas une expériences avancées en BAP.

Cette méthodologie a été vérifiée sur des formulations des BAP composées à partir des matériaux locaux. L'application de la nouvelle méthodologie s'est avérée bien convenable, une bonne formulation du BAP a été abouti.

Mots clés : Béton Auto-Plaçant BAP, viscosité du béton, fluidité du béton, méthodes de formulation.

* **Associate Professor, Department Of Construction Engineering and Management, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
** **Assistant, Department Of Construction Engineering and Management, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

مقدمة :

تُطلق تسمية البيتون ذاتي التوضع أو ذاتي الارتصاص على البيتون الذي لا يحتاج إلى رج كي يأخذ مكانه في القالب، ويكون قادراً على الجريان بتأثير وزنه الذاتي، وقادراً على ملء قالب الصب بشكل كامل والوصول إلى الارتصاص التام، حتى مع وجود مكثف للتسليح، لنحصل على بيتون متصلب مكتنز ومتجانس له الخواص الميكانيكية ذاتها لبيتون تم رصه بالطرق التقليدية المعروفة [2].

تُعتبر خاصية عدم الحاجة إلى الرص بعد الصب من أهم خصائص هذا البيتون. فهو يتمتع بقدرته على التوضع في المكان و أخذ شكل القالب دون ترك أي فراغ تحت تأثير وزنه الذاتي، مما يحقق أكبر نسبة امتلاء للقالب الذي يصب فيه حتى و إن تم الصب ضمن قالب يحوي شبكة كثيفة من التسليح. مع التنويه إلى أن البيتون المتصلب الذي نحصل عليه بعد ذلك سيمتلك بنية مكتنزة متجانسة، و سيتمتع بالديمومة و الخصائص الهندسية نفسها التي يتمتع بها البيتون التقليدي والذي خضع لعملية الرج، مما سينعكس إيجاباً على توفير العمالة اللازمة لعملية الرج و المعدات الخاصة بهذه العملية، وهو بدوره سيؤثر إيجابا على حماية البيئة عن طريق تخفيف تلوثها بالضجيج، إضافة إلى الخصائص الأخرى التي سيوفرها كتأمين سطوح بيتونية ملساء تحتاج لمعالجة دنيا بعد فك القالب، والملء الجيد للمقاطع المحددة والمناطق صعبة الوصول، و إمكانية تحقيق سطوح إنشائية ومعمارية ذات أشكال لا يمكن تحقيقها بالبيتون العادي، و التغليف المثالي لشبكة التسليح مهما بلغت درجة كثافتها، و التلاحم الجيد لقضبان التسليح مع البيتون، و التشققات القليلة التي تسمح باستثمار هذا النوع من البيتون بالشكل الأمثل عند صب الخزانات التي لا تتحمل أية تشققات في بنيتها بفضل التصميم الدقيق و احتواء الخلطة على كمية هامة من المواد الناعمة [3]، و مدة الإنشاء القصيرة، والكلفة و الضجيج المنخفضين.

لذلك كان لا بد من الاهتمام بهذا النوع من البيتون، والعمل على التحسين المستمر في خصائصه و مواصفاته وفق أسس علمية واضحة و محددة، مما يساعد في استخدامه عملياً في صب جميع المنشآت الهندسية.

أهمية البحث وأهدافه :

على الرغم من المزايا العديدة التي يتمتع بها البيتون ذاتي التوضع، إلا أن الطريقة المتبعة حاليا في تصميم خلطات هذا النوع الخاص من البيتون تحتوي على العديد من السلبيات والصعوبات، ومن أهمها الحاجة إلى الخبرة الكافية كونها طريقة تجريبية بحتة وذلك لما ينطوي عليه هذا النوع من البيتون من تناقض في المتطلبات [4]، فهو بحاجة إلى ميوعة عالية من أجل أداء وظيفته من حيث ملء القالب دون الحاجة إلى رج والوصول إلى الارتصاص التام، كما أنه بحاجة إلى لزوجة عالية منعاً لانفصال الحصويات [5]. إن ندرة وجود هذه الخبرة يأتي على رأس قائمة السلبيات الخاصة بالطريقة الحالية.

قمنا في هذا البحث باستعراض هذه السلبيات من خلال تطبيق مثال مخبري تجريبي من أجل الوصول إلى خلطة مرجعية لبيتون ذاتي التوضع.

تأتي أهمية هذا البحث من كونه يضع منهجية عمل جديدة واضحة المعالم ذات خطوات محددة، تُعالج من خلالها مساوئ الطريقة الحالية، و تضع بعدها أسساً محددة تسمح بالوصول إلى التصميم المثالي لخلطة البيتون ذاتي التوضع من قبل المستخدمين. كنا قد قمنا بتجريب هذه المنهجية مخبرياً لإثبات إمكانية تطبيقها، و الوقوف على

فعاليتها، و هو ما بدا واضحاً من خلال النتائج التي وضحت تحسين مواصفات الخلطة المرجعية المصممة بالتجريب و الخبرة.

طرائق البحث ومواده :

اعتُمدت في هذا البحث الطرق التجريبية المتبعة سابقاً لصب و تحقيق خلطات البيتون ذاتي التوضع، بالإضافة إلى الخلطات الجديدة التي تمت مراعاة المنهجية الجديدة فيها، و التي سنقوم بشرحها بالتفصيل.

لا بد من الإشارة هنا إلى أن البحث قد تم على أنواع محددة من الإحضارات المحلية لدراسة قابليتها للاستخدام في خلطات البيتون ذاتي الارتصاص. و من الضروري المرور بالمراحل نفسها عند استخدام مواد مختلفة المصدر و التركيب و المواصفات.

3. 1. الإحضارات :

استُخدمت المواد التالية في البحث لتحضير الخلطات البيتونية المختلفة:

a) إسمنت بورتلاندي عادي أسود تصنيف I صنع معمل إسمنت طرطوس مُصنَّع وفق المواصفة السورية رقم 1987/63 بصنف 32.5 .

b) رمل نهري خشن بمعامل نعومة قدره $Mf=3.76$.

c) رمل ناعم بمعامل نعومة قدره $Mf=1.72$.

d) فيلر كلسي سطحه النوعي يساوي $2000cm^2/g$ و وزنه الحجمي الصلب ($\rho_s=2.6g/cm^3$) .

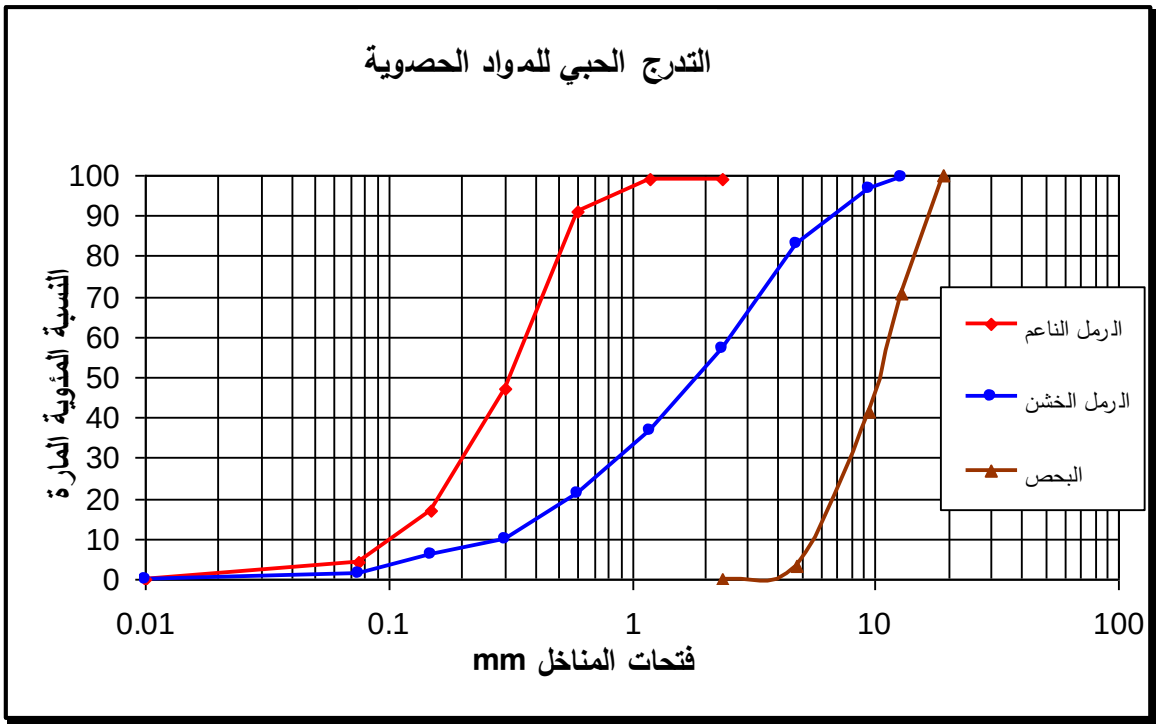
e) حصويات كلسية قاسية بمعامل لوس أنجلوس ($LA=17\%$) قطرها الأعظمي ($D_{max}=16mm$).

f) ملدن عالي الفعالية مصنَّع من مواد كيميائية خاصة خالية من الكلور و من النيترات من شركة محلية مختصة بكيماويات البيتون.

g) ماء للجبل قابل للشرب.

يبين الشكل (1) التدرج الحبي لجميع المواد الحصوية التي تم استخدامها في البحث و التي تتراوح أقطارها بين 0 و 20mm.

يبدو من المنحنيات أدناه أن الحصويات المستخدمة جيدة التدرج و تغطي بشكل مقبول جميع مجالات الأقطار الحصوية من 0 حتى 20mm.



الشكل (1) : منحنيات التدرج الحبي للحصويات المستخدمة

تم في الخلطات التجريبية استخدام خليط من الرمل بنسبة 50% من الرمل الخشن إلى 50% من الرمل الناعم و ذلك لتحقيق معامل نعومة مناسب لخليط الرمل بجوار الـ Mf=2.7 .

النتائج والمناقشة :

تعتمد الطرق الحالية في التصميم على تحقيق الاشتراطات الثلاثة الأساسية لاعتماد تسمية البيتون ذاتي التوضع، و التي يمكن تلخيصها بما يلي [6]:

a) قطر انبساط وفق اختبار الانبساط المعياري الذي تعرفه الاشتراطات الأوروبية باستخدام مخروط أبرامز و الذي يجب أن تقع قيمته ضمن المجال:

$$\mathbf{700mm \geq D_m \geq 600mm}$$

حيث D_m القطر الوسطي للانبساط :

$$\mathbf{D_m = (D_1 + D_2)/2}$$

b) نسبة إملاء ضمن العلبة L (L-Box) وفق اختبار الجريان المعياري الذي تعرفه الاشتراطات الأوروبية باستخدام العلبة L (L-Box) و الذي يجب أن تقع قيمته ضمن المجال:

$$\mathbf{H_2/H_1 \geq 80\%}$$

c) نسبة ملاط عابر من المنخل N4 وفق اختبار الاستقرار في المنخل المعياري الذي تعرفه الاشتراطات الأوروبية و الذي يجب أن تقع قيمته ضمن المجال:

الجدول (1) : حدود القبول لقيم الاستقرار في المنخل

النسبة الوزنية للملاط المار من المنخل رقم 4	وصف استقرار البيتون في المنخل
$15\% \geq \pi \geq 0\%$	استقرار مقبول
$30\% \geq \pi > 15\%$	استقرار حرج (حدي)
$\pi > 30\%$	استقرار مرفوض (انفصال مؤكد للحصويات)

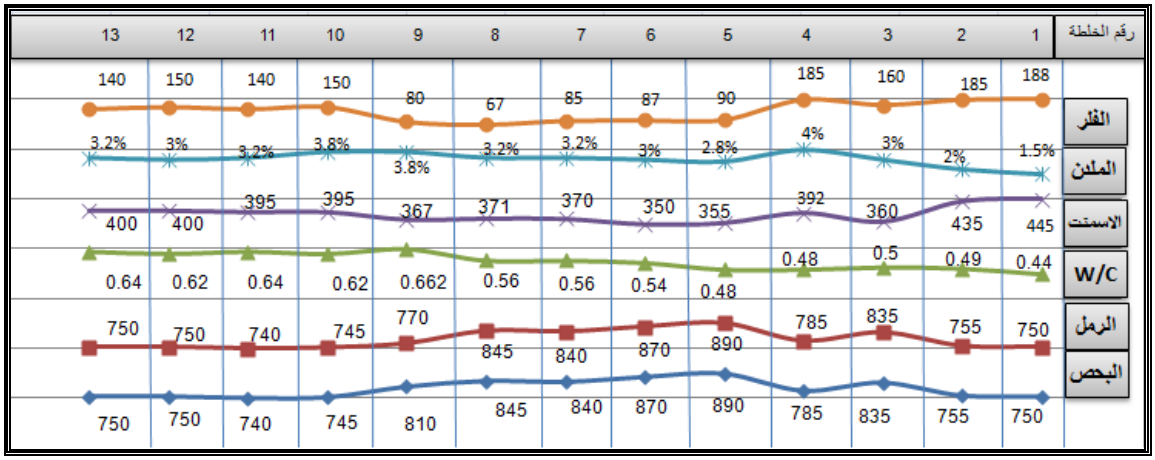
حيث : π النسبة المئوية للملاط المار من المنخل رقم 4 و المحسوبة كما يلي :

$$\pi = 100\times(\text{وزن البيتون المصبوب})/(\text{وزن الملاط المار})$$

تعتمد الطريقة المتبعة حاليا من أجل إيجاد خلطات بيتون ذاتي التوضع على تصميم خلطة بطريقة المعايرة المتتالية انطلاقاً من إيجاد تصميم أولي للخلطة باتباع إحدى الطرق المعروفة [7]. يتم تعديل الخلطة الأولية بهدف الوصول إلى التصميم الصحيح من خلال إجراء معايرة متتالية على المواد الناعمة و عيار الإسمنت والملدن ونسبة الماء إلى الإسمنت بهدف تحقيق الشروط الثلاثة المطلوبة مع مراعاة بعض النقاط الأساسية عند التصميم كاستخدام حصويات بقطر أقل من 16mm، و نسبة وزنية للبحص إلى الرمل قريبة من الواحد.

تم اعتماد هذه المنهجية للوصول إلى تصميم يحقق الاشتراطات الثلاثة الأساسية و ذلك مروراً بثلاثة عشر تصميماً حقق آخرها فقط تلك الاشتراطات.

يبين الشكل (2) مراحل التصميم وفق الطريقة المتبعة حالياً، و فيه يظهر مقدار التعديل الذي طرأ على كل مكون من مكونات الخلطة باتجاه الوصول إلى التصميم الصحيح للبيتون ذاتي التوضع.



الشكل (2): تغير تراكيب الخلطات على طريق الوصول للتصميم الصحيح لخلطة الـ SCC.

تم اعتماد الخلطة الثالثة عشرة كخلطة مرجعية لتحقيقها الشروط الثلاثة التي يتطلبها البيتون ذاتي التوضع، وذلك وفق التركيب النهائي التالي:

الجدول (2): تركيب الخلطة المرجعية المعتمدة للبيتون ذاتي التوضع

المكون	البحص	الرمل	الإسمنت	الفيلر	الماء	الملدن	W/C
العيار (kg/m^3)	750	750	400	140	256	12.8	0.64

1. سلبيات المنهجية الحالية المتبعة في التصميم:

من خلال استعراض الطرق المتبعة حالياً في تصميم خلطات البيتون ذاتي التوضع، تم رصد مجموعة من السلبيات التي تعوق التصميم السهل و السريع لهذه الخلطات، و هو ما حاولت المنهجية الجديدة المقترحة تلافيه في التصميم. يمكن تلخيص هذه السلبيات بالنقاط التالية:

5-1. الحاجة لخبرة في المعايرة بسبب غياب منهجية واضحة للعمل: إذ يقتضي التعديل في كل مرحلة السؤال عن المكون موضوع التعديل، وهل التعديل سيكون بالزيادة أم بالنقصان؟ وما هي قيمة هذا التعديل؟ إذ سيقود نقصان الخبرة إلى عدد كبير من الخلطات التجريبية من أجل الوصول إلى خلطة بيتون ذاتي التوضع محققة للشروط **المتضاربة.**

5-2. صعوبة المقارنة بين خلطتين محققتين لاشتراطات البيتون ذاتي التوضع: إذ لا يوجد طريقة محددة واضحة المعالم لاختيار الخلطة المثلى و التي تحقق مع الخلطات الأخرى شروط التسمية، فقد تكون إحداها مثلا أفضل من حيث قيمة استقرار المنخل، في حين أن الأُخرى متفوقة على الأولى من حيث قطر الانبساط.

5-3. عدم إمكانية ضمان التحسين المستمر في الخلطات: إذ قد يقود التعديل في التركيب إلى تحسين في إحدى الخصائص المستهدفة، و مع تكرار التعديل لتحسين خاصية أخرى قد تنخفض تلك القيمة إلى دون المستوى المطلوب.

5-4. لا تسمح بدراسة تأثير مكون محدد على الخصائص الريولوجية أو الميكانيكية: حيث يتم التعديل عادة على أكثر من مكون دفعة واحدة، مما لا يتيح معرفة تأثير كل مكون على حدة، حتى لو تمت المعايرة على مكون واحد فإن ذلك يتم لمرة واحدة على الأغلب و هو ما يبدو غير كاف لدراسة تأثير هذا المكون على مواصفات الخلطة.

5-5. صعوبة متابعة التصميم من قبل فريق آخر قد تختلف خبرته و أسلوب عمله عن الفريق الذي بدأ العمل في ظل غياب منهجية محددة للتصميم.

2. خطوات المنهجية الجديدة لتحسين خلطات البيتون ذاتي التوضع:

بعد الحصول على تركيب الخلطة بالطريقة التقليدية باعتماد المعايرة المتتالية للمكونات بهدف تحقيق الاشتراطات الثلاثة المذكورة سابقاً، لا بد من عرض الخطوط الرئيسية التي تشكل أساس المنهجية الجديدة و التي يمكن تلخيصها بما يلي:

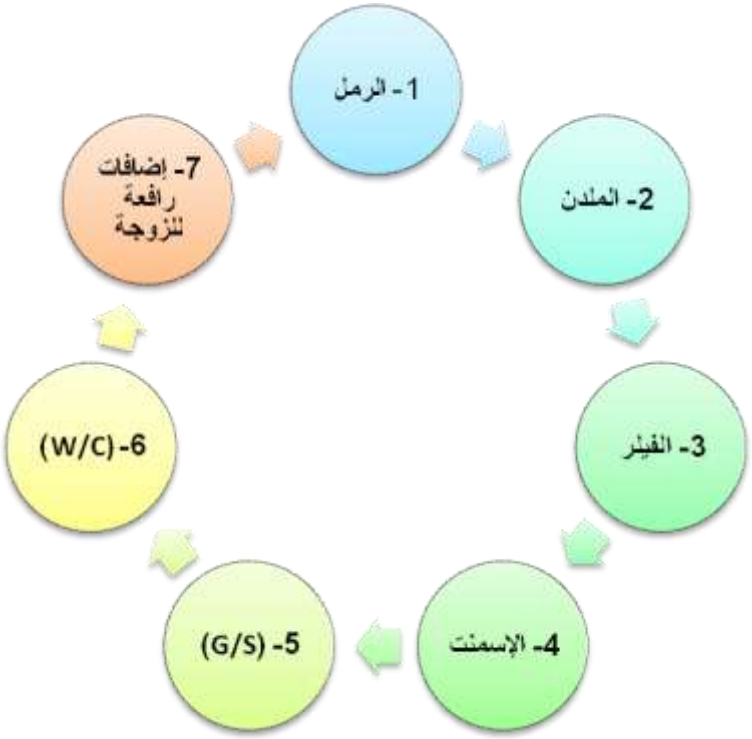
6-1. تثبيت جميع مكونات الخلطة ما عدا مكون واحد، حيث نقوم بتغير عيار هذا المكون أو خاصية من خواصه (كمعامل نعومة الرمل أو مكافئه الرملي)، و صب مجموعة من الخلطات بعدد التعديلات على العيار أو الخواص، و من ثم تحديد مواصفات كل خلطة مصبوبة في هذه المرحلة.

6-2. تحديد الخلطات المحققة لشروط التسمية من بين الخلطات المصبوبة و إعطاؤها درجات للتقييم وفق أسس محددة مفصلة لاحقاً.

6-3. اختيار الخلطة ذات التقييم الأعلى، وتثبيت عيار أو خاصية المكون المدروس.

6-4. تكرار الخطوات السابقة بنفس التسلسل على مكون آخر كعيار الملدن مثلاً.

يبين المخطط التوضيحي التالي تسلسل المراحل الموضحة سابقاً بشكل حلقي يمثل آلية المعايرة المتتالية بهدف الوصول إلى العيار الأمثل لكل مكون.



الشكل (3) : مراحل تطبيق المنهجية الجديدة لتحسين خلطات البيتون ذاتي التوضع

و لتوضيح آلية العمل بالمخطط السابق تم تطبيقه مرحلياً على حالة عملية تنطلق من الخلطة المرجعية التي تم عرض تركيبها سابقاً.

سنحتاج من أجل اعتماد عيار مكون ما إلى **درجة تقييمه** و التي تُعطى بحسب تأثير هذا العيار على القيم التي تبعد البيتون أو تقربه عن تسمية البيتون ذاتي التوضع.

- **الطريقة المتبعة في إعطاء درجات التقييم:**

لمنح درجة تقييم لخلطة ما سيتم الاعتماد على المعادلة الأساسية التالية:

$$Y=0.4*(30X1-20)+0.15*(-40X2+10)+0.15*(0.6X3-32)+0.3*(0.3X4-2)$$

حيث :

Y هي درجة التقييم المطلوب حسابها للخلطة.

X1 هي قيمة H2/H1 و التي تمثل نتيجة تجربة الـ L-Box .

X2 هي قيمة π و التي تمثل نتيجة اختبار الاستقرار في المنخل.

X3 هي قيمة Dm بالسنتيمتر و التي تتمثل نتيجة اختبار الانبساط بمخروط أبرامز.

X4 هي قيمة Rc28 بالـ Mpa و التي تمثل نتيجة اختبار البيتون المتصلب على الضغط البسيط.

تستخدم هذه المعادلة من أجل الخلطات التي تحقق اشتراطات البيتون ذاتي التوضع **فقط** والتي تزيد مقاومتها عن 20Mpa، وتتراوح قيمة درجات التقييم الخاصة بها بين حد أدنى هو 4 درجات، وحد أقصى هو 10 درجات.

تُعطى الدرجة الدنيا 4 عندما يكون لدينا بيتون ذاتي التوضع يحقق الاشتراطات اللازمة بحدها الأدنى:

- ✓ H2/H1=0.8
- ✓ قطر الانبساط Dm=60mm
- ✓ معامل الاستقرار في المنخل π=15%
- ✓ المقاومة على الضغط البسيط Rc28=20Mpa

تُعطى الدرجة القصوى 10 عندما يكون لدينا بيتون ذاتي التوضع يحقق الاشتراطات اللازمة بحدها الأقصى:

- ✓ H2/H1=1
- ✓ قطر الانبساط Dm=70mm
- ✓ معامل الاستقرار في المنخل π=0%
- ✓ المقاومة على الضغط البسيط Rc28≥40Mpa

مع التنويه بأنه لن يتم حساب درجة تقييم للخلطات التي لا تحقق الشروط الأربعة مجتمعة. علماً بأنه قد تم اقتراح المعادلة على أساس حد أعلى للمقاومة على الضغط البسيط هو Rc28=40Mpa يدخل في المعادلة بهذه القيمة حتى و لو تجاوزت المقاومة 40Mpa.

تُحسب درجة التقييم الجزئية Y1 الخاصة باختبار الجريان في العلبة L لـ تالـ يةبـ الـ علاقة الـ خط ية ا:

Y1=30X1-20

و التي تعطي القيمة Y1=10 عند القيمة المثلى للجريان X1=1، و القيمة Y1=4 عند القيمة الدنيا للجريان X1=0.8.

تُحسب درجة التقييم الجزئية Y2 الخاصة باختبار الاستقرار في المنخل بـ الـ علاقة الـ خط ية الـ تالـ ية:

Y2=-40X2+10

و التي تعطي القيمة Y2=10 عند القيمة المثلى للاستقرار X2=0، و القيمة Y2=4 عند القيمة الدنيا للاستقرار X2=0.15.

تُحسب درجة التقييم الجزئية Y3 الخاصة باختبار الانبساط بـ الـ علاقة الـ خط ية الـ تالـ ية:

Y3=0.6X3-32

و التي تعطي القيمة Y3=10 عند القيمة المثلى للانبساط X3=70cm، و القيمة Y3=4 عند القيمة الدنيا للانبساط X3=60cm.

تُحسب درجة التقييم الجزئية Y4 الخاصة باختبار المقاومة على الضغط البسيط بـ العلاقة الخطية التالية:

Y4=0.3X4-2

و التي تعطي القيمة Y4=10 عند القيمة المثلى للمقاومة X4=40Mpa، و القيمة Y4=4 عند القيمة الدنيا للمقاومة X4=20Mpa.

تم اعتماد قيم التثقيل الخاصة بكل اشتراط من الاشتراطات الأربعة في المعادلة الأساسية للتقييم وفق ما يلي:

الجدول (3): قيم التثقيل الخاصة باشتراطات تسمية البيتون ذاتي التوضع

الاشتراط	قيمة التثقيل
اختبار الجريان في العلبة L	0.4
اختبار الاستقرار في المنخل	0.15
اختبار الانبساط	0.15
اختبار المقاومة على الضغط البسيط	0.3
المجموع	1

3. تطبيق عملي على المنهجية المقترحة لتحسين خلطات الـ BAP:

لإجراء التحسين المطلوب بهدف الوصول إلى خلطة مثلى للبيتون ذاتي التوضع، تم الانطلاق من الخلطة المرجعية المعتمدة و التي رمزنا لها في الشكل (2) بالخلطة رقم 13.

تم اعتماد معامل نعومة الرمل كمرحلة رقم 1 ضمن الحلقة. مع قيمة بدائية معتمدة في الخلطة المرجعية و قدرها Mf=2.74 .

و بمزج نسب مختلفة من الرمل الناعم و الرمل الخشن حصلنا على أربع خلطات إضافية بمعاملات نعومة متباينة كما يلي :

الجدول(4): معاملات نعومة خلطات الخطوة الأولى ونسب الرمل المحققة.

رمل خشن	100%	75%	50%	25%	0%
رمل ناعم	0%	25%	50%	75%	100%
معامل النعومة Mf	3.76	3.25	2.74	2.23	1.72

وبالتالي تكون تراكيب الخلطات الخمس (مرجعية + 4 إضافية) على الشكل التالي:

الجدول (5) : تراكيب خلطات المرحلة الأولى بالـ Kg/M^3

رقم الخلطة	ملدن	فيلر	رمل خشن	رمل ناعم	بحص	ماء	اسمنت
1	13	140	375	375	750	256	400
2	13	140	0	750	750	256	400
3	13	140	187	563	750	256	400
4	13	140	563	187	750	256	400
5	13	140	750	0	750	256	400

ثم قمنا بإجراء التجارب المخبرية اللازمة على البيتون الناتج وكانت النتائج كما يلي:

الجدول (6) : نتائج خلطات الخطوة الأولى من الحلقة

رقم الخلطة	Rc28 (Mpa)	H2/H1	π	Dm (cm)	القبول	درجة التقييم (Y)
1	22.07	0.83	0.15	65	مقبولة	5
2	18.92	0.86	0.16	57	مرفوضة	X
3	16.4	0.84	0.14	66	مرفوضة	X
4	25.75	0.82	0.13	68	مقبولة	5.6
5	21.05	0.75	0.08	61	مرفوضة	X

تمت الإشارة بخط إلى الاختبارات التي كانت سبباً لرفض الخلطات المدروسة.

من الجدول السابق يمكن تحديد درجات تقييم الخلطات المقبولة و التي يتبين منها بأن الخلطة رقم 4 هي الأفضل بدرجة تقييم قدرها 5.6.

للانتقال للمرحلة التالية، ينبغي تثبيت عيارات مكونات الخلطة ذات التقييم الأفضل مع تغيير عيار الملدن [8] و الذي يمثل المرحلة الثانية من مراحل المنهجية المقترحة و ذلك بصب خلطات بنسب مختلفة من الملدن يمكن اقتراحها على النحو التالي: .S/C=3.2% - 3% - 2.8% - 2.6% - 2.4%.

تقتضي المنهجية الجديدة بصب هذه الخلطات وإجراء تجارب المطابقة اللازمة وإعطاء الدرجات التي تم تعريفها سابقاً لهذه الخلطات، بحيث تُعتمد للمرحلة اللاحقة الخلطة ذات الدرجة الأعلى.

بعد الوصول إلى الخلطة المثلى من حيث قيمة معامل نعومة الرمل المستخدم، و نسبة الملدن المثلى، نقوم بتكرار العملية حتى إغلاق الحلقة التي تعتمدها المنهجية المقترحة و التي ستنتهي بتحديد النسب المثالية لكل مكون من مكوناتها.

يمكن اقتراح الهوامش التالية لتعديل المكونات المتبقية بهدف الوصول إلى النسب المثلى لكل مكون.

الجدول (7): هوامش التغيير المقترحة لتعديل المكونات خلال الخطوات التالية من الحلقة

المكون	هامش التعديل المقترح			
الفيلر	+40%	+20%	-20%	-40%
الإسمنت	يمكن تجريب أصناف مختلفة			
G/S	0.8	0.9	1.1	1.2
W/C	0.62	0.6	0.58	0.56
إضافات رافعة للزوجة	1%	2%	3%	4%

تجدر الإشارة هنا إلى أن انتهاء العمل بالحلقة لدورة واحدة لا يعني انتهاء التصميم وفق هذه المنهجية، فعند إتمام الخطوات السبعة للحلقة و المبينة في الشكل 3 ، والعودة الى منطلق الحلقة للمرة الثانية، تكون خواص أو تراكيب المكونات السبعة قد اختلفت عن نقطة البداية، مما سيسمح بتوليد عدد لا نهائي من الحلقات و ذلك وصولاً إلى إلى درجة الرضا المطلوبة.

4. إيجابيات المنهجية المقترحة لتحسين خلطات الـ BAP:

8-1- وجود منهجية واضحة للعمل:

فطريقة العمل و تسلسل مراحله تتسم بالوضوح وفق هذه المنهجية، و هي تقتضي تثبيت جميع المكونات في الخلطة باستثناء مكون وحيد نقوم بتغير نسبه أو خواصه بهدف الوصول إلى قيمة مثلى. في حين أن الطريقة المتبعة حالياً تعتمد على الخبرة و التجريب المتتالي و هو ما يزيد التصميم صعوبةً، و يتطلب خبرات خاصة.

8-2- يكفي التقيد بمراحل العمل لتحسين التصميم :

و هو ما سيجعل بالإمكان تنفيذ تحسين الخلطة دون أن يتطلب ذلك خبرة عالية في مجال التصميم.

8-3- من الممكن المقارنة بين عدة خلطات مقبولة:

وذلك من خلال المنهجية المقترحة و آلية منح الدرجات للخلطات المقبولة اعتماداً على نتائج التجارب. تفيد عملية المقارنة هذه في اختيار الأفضل من عدة خلطات محققة لاشتراطات التسمية للبيتون ذاتي التوضع.

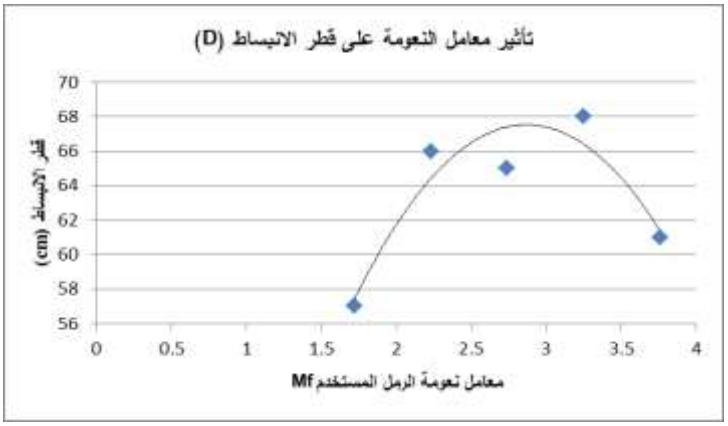
8-4- توافر إمكانية التحسين المستمر للخلطات المقبولة :

إذ تقتضي المنهجية اختيار الخلطة ذات درجة التقييم الأعلى، و هو ما سيقود إلى خلطات محسنة لن تنخفض سويتها، أي أنه لن يكون هناك في أي مرحلة من مراحل الحلقة تراجعٌ في أداء الخلطة موضوع التصميم. و كمثال واضح على ذلك، بينت النتائج أن الخلطة المرجعية المقبولة التي بدأنا بها كان لها درجة التقييم 5، وبعد إنجاز الخطوة الأولى من الحلقة تحسن الأداء و ارتفعت درجة التقييم إلى الـ 5.6.

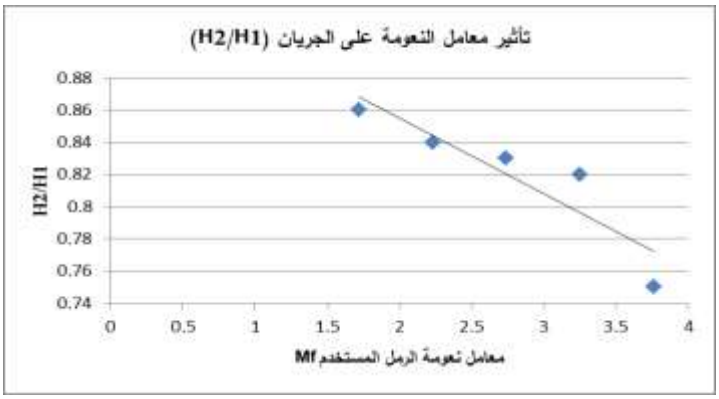
8-5- إمكانية دراسة تأثير مكون محدد على خواص الخلطة:

إذ إننا نقوم في كل خطوة بتغيير نسب أو خصائص مكون واحد فقط، و هو ما يحتاج لصب أربع خلطات إضافية بالإضافة إلى الخلطة المرشحة من المرحلة السابقة في الحلقة، مما سيتيح لنا التعامل مع نتائج خمس خلطات تسمح برسم منحنيات بخمس نقاط تُعتبر كافية لرسم مخططات و إيجاد معادلات توضح تغير خواص الخلطة بتغير كمية أو خاصية مكون ما.

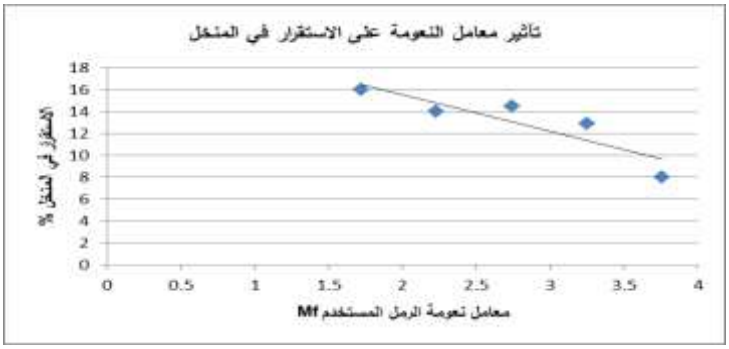
و كمثال تطبيقي على ذلك، تبين الأشكال 4-a ، 4-b ، 4-c و 4-d تأثير تغير قيم معامل نعومة الرمل المستخدم في الخلطة على الخصائص الريولوجية و الميكانيكية المتمثلة بالمقاومة على الضغط البسيط لخلطات البيتون ذاتي التوضع.



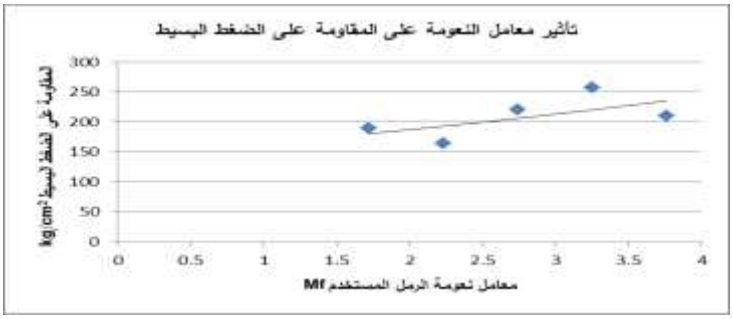
الشكل (4-a) : تأثير معامل النعومة Mf على قطر الانبساط



الشكل (4-b) : تأثير معامل النعومة Mf على قابلية الجريان في العلبة L BOX



الشكل (4-c) : تأثير معامل النعومة Mf على الاستقرار في المنخل



الشكل (d–4) : تأثير معامل النعومة Mf على المقاومة على الضغط البسيط

الاستنتاجات والتوصيات:

1) توصلنا في بحثنا إلى إيجاد تصميم دقيق للبيتون ذاتي التوضع يحقق اشتراطات التسمية المعرفة في البحث، و ذلك من الإحضارات المحلية المذكورة بعد سلسلة من الاختبارات و معايرة المكونات و التحسين المتتالي دون استخدام الإضافات الرافعة للزوجة و التي تم التعويض عنها بزيادة عيار المواد الناعمة من إسمنت و فيلر، و استخدام نسبة ملدن مرتفعة نسبياً تجاوزت الـ 3% من وزن الإسمنت [10].

2) تبدي المنهجية المقترحة لتحسين خلطات البيتون ذاتي التوضع مرونة جيدة، و تسمح بالتحسين المتتالي لمواصفات الخلطة الريولوجية و الميكانيكية و ذلك من خلال اعتماد النسب التي تعطي الخلطات المختبرة درجات التقييم الأعلى و التي تم تعريف أسس منحها بشكل مفصل في البحث.

3) تمكنا في هذا البحث من الدراسة المعمقة لتأثير معامل نعومة الرمل المستخدم في الخلطة على الخصائص الريولوجية و الميكانيكية للبيتون (قابلية الجريان، قطر الانبساط، مقاومة انفصال الحصويات و الاستقرار في المنخل، المقاومة على الضغط البسيط). إذ بينت النتائج أن القيمة المثالية التي أعطت الدرجة الأعلى للتقييم كانت بحدود الـ Mf=3.2 مع التنويه بأن الخصائص الريولوجية للبيتون تتحسن عموماً كلما انخفض معامل النعومة [9]، أما المقاومة على الضغط البسيط فتتطلب زيادتها قيمة أكبر لمعامل النعومة و هو ما جعل قيمة معامل النعومة المعتمدة بحدود الـ 3.2 مع تسجيل إمكانية تخفيضها في حال تمكنا من رفع المقاومة باستخدام إسمنت بصنف أعلى، أو باستخدام إضافات من شأنها رفع المقاومة الميكانيكية كهباب السيليس مثلاً.

4) تتيح المنهجية المقترحة لتحسين خلطات البيتون ذاتي التوضع إجراء التحسين من قبل مهندسين لا يمتلكون بالضرورة الخبرة العالية في مجال البيتون ذاتي التوضع.

5) لا بد من الإشارة إلى أن تنفيذ الحلقات المقترحة في هذه المنهجية، و رسم المنحنيات الخاصة بتأثير كل مكون على خصائص الخلطات، سيسمح بتنظيم قواعد بيانات تسهل للمصمم اقتراح خلطة المنطلق المرجعية، و تقلل حكماً من عدد الحلقات الواجب إجراؤها للوصول إلى درجات تقييم مرتفعة تفيد في اعتماد تصميم نهائي أمثل لخلطة البيتون ذاتي التوضع.

كما يمكن أن نسجل التوصيات التالية و التي من شأنها العمل على تحسين شروط تصميم خلطات البيتون ذاتي التوضع :

1) إجراء تطبيقات عملية إضافية على المنهجية المقترحة في البحث بهدف الوصول إلى اعتماديتها مما سيسمح مستقبلاً بتقديم التصاميم السريعة لخلطات البيتون ذاتي التوضع مهما اختلفت مصادر الإحضارات، و خواص المواد المكونة للخلطة.

2) التأكيد على ثبات مصادر الحصويات من أجل تصميم معطى للبيتون ذاتي التوضع، و إجراء التعديلات اللازمة على التصميم عند اختلاف مواصفات هذه الإحضارات

3) التأكيد على ضرورة متابعة الأبحاث المتعلقة بالبيتون ذاتي التوضع لما له من مميزات وأهمية في قطاع البناء، و خاصة مع التوافر الغزير للمواد المحلية اللازمة مختلفة الخواص في سوريا.

4) متابعة العمل وفق المنهجية المقترحة في هذا البحث لتحسين خلطات البيتون ذاتي التوضع بهدف إيجاد نتائج و معطيات توضح علاقة خواص و عيار المكونات على الخصائص الريولوجية و الميكانيكية للخلطة، مما سيسمح بتصميم **نظام خبير (Expert System)** يقوم بتوقع تراكيب خلطات تلبي مجموعة من المتطلبات التي يقتضيها العمل وذلك اعتماداً على القاعدة المعرفية **(Knowledge Base)** التي سيتم بناؤها و تغذيتها تباعاً من النتائج و المعطيات و المنحنيات المتولدة باتباع المنهجية المقترحة لتصميم و تحسين خلطات البيتون ذاتي التوضع.

المراجع:

1. ASSIE S., *Durabilité des Bétons Auto-Plaçants*, thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, octobre 2004.
2. TURCRY P., *Retrait et fissuration des bétons auto-plaçants – Influence de la formulation*, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, France, 2004.

Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 17-20 août 2003.

3. MALHOTRA, V. M. *Matériaux Complémentaires en cimentation pour le béton*, Ottawa, Minister of Supply and Services, Canada, 1989, 471.
4. OKAMURA, H. et al. *Self-compacting high performance concrete*, Proceeding of the Fifth EA SEC, vol.3, 1995, pp.2381-2388.
5. OKAMURA, H. , OUCHI, M. *Self-compacting concrete, Development, present and future*, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, septembre 1999, pp. 3-14, 13-15.
6. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use*, www.efca.info or www.efnarc.org, May 2005, 63.
7. PETERSSON, Ö. , BILLBERG, P. , VAN, B. K. *A model for Self-Compacting Concrete", International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete*, RILEM Proceedings, 1996, 32.
8. خيربك، علي. *أثر الاستخدام الأمثل للملدنات على مواصفات المونة الإسمنتية في الحالة الطرية والصلبة*، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية- سلسلة العلوم الهندسية، جامعة تشرين، المجلد (30) العدد (1) 2008، 29 – 39.
9. 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.
10. طريفي، زكائي، خيربك، علي، غدير، وسيم، *تغيير أداء الملدنات باختلاف نوع الإسمنت المستخدم في الخلطة البيتونية*، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية– سلسلة العلوم الهندسية، جامعة تشرين، المجلد (33) العدد (3) 2011، 141 – 159.