دراسة تجريبية مقارنة لتأثير الإضافات الصناعية في مقاومات البيتون*

م. حسام بلّوط**

أ.د. محمد غريب* **د.م. هالة حسن *****

الملخص

هناك أنواع عديدة من الألياف الصناعية (ألياف البولي بروبيلين – الألياف الزجاجية – بودرة السيليكافيوم- وغيرها) المستخدمة استخداماً واسعاً كإضافات لتحسين مقاومات البيتون. وقد اهتمت العديد من البحوث العلمية الهندسية مؤخراً بالدور الذي تؤديه هذه الألياف في تحسين مقاومات البيتون. لذلك تناولنا في بحثنا هذا دراسة تأثير كل من ألياف البولي بروبيلين والألياف الفولاذية وبودرة السيلكافيوم في مقاومات البيتون، وذلك من خلال دراسة تأثيرها في خلطة بيتونية عادية وخلطة بيتونية مع رمل مازار. وتبيّن من دراسة مقاومات الخلطات مع الألياف تحسن مقاومة البيتون على الشد بنسبة قليلة نسبياً، في حين ارتفعت مقاومة البيتون على الضغط، كما تغيّر شكل انهيار العينات البيتونية تبعاً لنوع الإضافة المستخدمة مقارنة بكل من البيتون (العادي و مع رمل المزار) دون إضافات، وبالبيتون مع الإضافات موضوع البحث.

الكلمات المفتاحية: البيتون، بولي بروبيلين، ألياف زجاجية، سيليكافيوم، مقاومة الشد، مقاومة الضغط، شكل الانهيار.

* أعد هذا البحث في سياق شهادة الدكتوراه في قسم الهندسة الإنشائية للمهندس حسام بلوط بإشراف الأستاذ الدكتور محمد غريب ومشاركة الدكتورة المهندسة هالة حسن.

** قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.

*** قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.

**** المعهد العالي للزلازل – جامعة دمشق.

1- **المقدمة**:

يعدُّ البيتون المادة الأساسية المستخدمة للبناء والإنشاء في معظم المنشآت الهندسية المعاصرة، وقد تبوأت هذا الموقع خلال عقود كثيرة مضت وهي مرشحة للمحافظة على هذا الدور عقوداً أخرى قادمة، وذلك على الرغم من التطور العلمي الهائل وما تمخض عنه من إنجازات كبيرة في المجالات كلّها ولاسيَّما صعيد مواد البناء والإنشاء، وقد أفضى ذلك إلى ظهور العديد من مواد البناء الجديدة التي تتمتع بخصائص فيزيائية وميكانيكية مختلفة ومتقدمة قابلة للتحسن باستمرار مطّرد.

وقد حصل البيتون على حصة وافرة من هذا التطور نتيجة الدراسات والاختبارات المتعددة التي تعرضت لتحسين مواصفاته ولا سيَّما مقاومته على الضغط، كما تم تجاوز العديد من سلبياته الأساسية التي تتلخص بمقاومته المنخفضة على الشد وضعف مقاومته للتشققات فضلاً عن انخفاض عتبة لدونته.

ولذلك اِستُخْدِمَ العديد من الإضافات بنوعيها الطبيعية والصناعية أو أية أنواع أخرى مع مكوناته الأساسية لدراسة مدى انعكاسها على خواص البيتون، وقد تطرقنا في بحثنا هذا إلى مقارنة تجريبية لمقاومات البيتون باستخدام أنواع مختلفة من الإضافات الصناعية.

2- **الإضافات الصناعية المستخدمة**:

2-1- **ألياف البولي بروبيلين Rheo-Fiber(1)**:

هي ألياف من البولي بروبيلين وقد تكون أحادية الخيط أو مركبة (متعددة الخيط) تورد بشكل أحادي الخيط أو مجموعة من الخيوط المترابطة بلاصق قابل للانحلال بالماء، تستخدم لمنع تشكل الشقوق الصغيرة التي يمكن أن تحدث خلال تشوهات البيتون اللدنة بعد الصب، كما تستخدم للسيطرة على ظهور التشققات في كل من الطينة والمونة الإسمنتية الناجمة عن الجفاف والتغيرات الحرارية للبيتون بهدف تأمين الإفادة من الخواص الحقيقية للمادة الإسمنتية المتصلبة. وتستخدم مع البيتون في العديد من المجالات نذكر منها: البلاطات – العناصر المستوية رقيقة المقطع كالجدران والجوائز العميقة – الخزانات – المنشآت البحرية – أرضيات الصناعات الثقيلة....

ومن ميزاتها:

1- تنتشر بشكل منتظم في الخلطة ممَّا يسهم في المحافظة على تجانس الخلطة وتحسين مقاومتها على التشقق.

2- يمكن أن تحل مكان شبكة التسليح المستخدمة لمنع التشققات في أرضيات المصانع والمستودعات.

3- تزيد من مقاومة البيتون للصدمات والتآكل.

4- تحسن من لدونة البيتون.

5- ترفع من مقاومة البيتون للتأثيرات القلوية، ومضادة للصدأ.

6- تقلل من آثار الأضرار اللاحقة فهي تحسن من مقاومة الحريق إِذْ تقلل من حوادث التساقط الانفجاري لطبقة التغطية عند زيادة الحرارة.

وتتصف ألياف البولي بروبيلين بما يأتي:

1- خالية من المواد القلوية والكبريتية والكلورايد ومكونة بشكل رئيسي من البولي بروبيلين المتماثل.

2- قطر الألياف 18 micron وطولها 12 mm.

3- وزنها الحجمي $0.91\ g/cm^3$، ولا يقل سطحها النوعي عن $230\ m^2/kg$.

4- لا تقل مقاومتها على الشد عن 350 Mpa ويراوح معامل مرونتها بين 3900 Mpa – 3500.

5- درجة ذوبانها 160° C.

6- متوافقة مع مواصفات ASTM C-1116.

يمكن استخدام ألياف البولي بروبيلين مع أنواع الاسمنت جميعها، ويتوافق مع الإضافات الأخرى جميعها، ويضاف إلى الخلطات البيتونية بمعدل $600\ gr/m^3$ ويخلط على الجاف قبل إضافة الماء ويؤدي استخدامه عادة إلى انخفاض قابلية التشغيل وزيادة في تماسك الخلطة البيتونية.

2-2- **الألياف الزجاجية Fiber mesh**(2):

وهي ألياف صناعية مكونة من طحن الزجاج عالي الأداء ويُعَادُ تصنيعه بشكل خيوط مجهزة خصِّيصىً للاستخدامات البيتونية وفي أعمال الطينة الإسمنتية، تتوافر بأطوال مختلفة 20 mm -18 -12 -6، وتستخدم لمنع حدوث التشققات الصغيرة التي يمكن أن تحدث عند تشوهات الانكماش للبيتون ونتيجة الجفاف والتغيّرات الحجمية الحرارية للبيتون المتصلب.

يمكن استخدامها في عدة مجالات منها:

تنفيذ الأرضيات الصناعية – البيتون مسبق الصنع – والبيتون المقذوف – والخزانات والصوامع – وأعمال الاكساء.

وتتصف الألياف الزجاجية بما يأتي:

1- خلوها من المواد القلوية والكبريتية والكلورايد.

2- يراوح قطرها بين micron 30 – 18 وتتوافر بأطوال متعددة 20 mm - 6.

3- وزنها النوعي $0.9\ gr/cm^3$.

تتميّز بخاصية سهولة انتشارها ضمن البيتون وتضاف إلى البيتون بنسبة تراوح بين $900\ gr/m^3 – 600$ في المرحلة الرطبة أو الجافة للبيتون وفي أية مرحلة من مراحل تصنيعه ، كما تتميّز بمقاومتها للقلويات، وبأنّها لا تؤثر في كمية الماء اللازمة للخلطة.

2-3 – **بودرة السيليكافيوم silica fume**(3) **Densified**:

هي مادة تضاف إلى البيتون فتغيّر البنية المسامية له تغييراً كبيراً وتجعله أكثر كتامة ومقاومة لأي من أنواع المؤثرات الخارجية، وهي متوافقة مع معايير الـ ASTM. تستخدم لإنتاج البيتون عالي المقاومة طويل العمر، وفي عدة مجالات منها: البيتون المقذوف – البيتون مسبق الصنع – البيتون المصبوب بالمكان – البيتون عالي المقاومة – البيتون المصبوب تحت الماء – المونة المستخدمة لملء جدران الأنفاق.

كما تستخدم لتحسين مقاومة البيتون والتقليل من الانفصال في مكونات الخلطة، وكذلك لتنفيذ طبقات سميكة نسبياً من البيتون أو المونة القابلة للرش.

وتتصف البودرة بما يأتي:

1- خفيفة القوام بلون رمادي داكن.

2- لا تزيد نسبة الكلورايد فيها على % 0.1.

3- كثافتها $550 – 700\ kg/m^3$

تستخدم بودرة السيليكافيوم بنسبة % 15 – 5 من وزن الاسمنت في الخلطة البيتونية العادية، وتضاف إلى البيتون في أثناء الخلط وبزمن مزج أدنى مقداره 95 sec .

3- هدف البحث:

الغاية من البحث هو دراسة تأثير الإضافات الصناعية (البولي بروبيلين – الزجاجية – السيليكافيوم) في مقاومات البيتون تجريبياً، وذلك من خلال المقارنة بين مقاومات البيتون العادي ومقاومات البيتون المقوى بكل نوع من الإضافات السابقة كل على حدة.

4- **الدراسة التجريبية**:

4-1- **الإحضارات**:

استخدمت في تصنيع البيتون المكونات الأساسية الآتية:

1- الاسمنت اِسْتُخْدِمَ اسمنت محلي ماركة 42.5 MPa.

2- الحصويات اِسْتُخْدِمَتْ عدة أنواع للحصويات وهي بحص فولي – بحص عدسي – رمل صب – رمل مزار.

3- الإضافات الصناعية، حيث اِسْتُخْدِمَتْ أليـاف البولي بروبيلين المركبة والألياف الزجاجية وبودرة السيليكافيوم وفق المواصفات الواردة في الإضافات أعلاه.

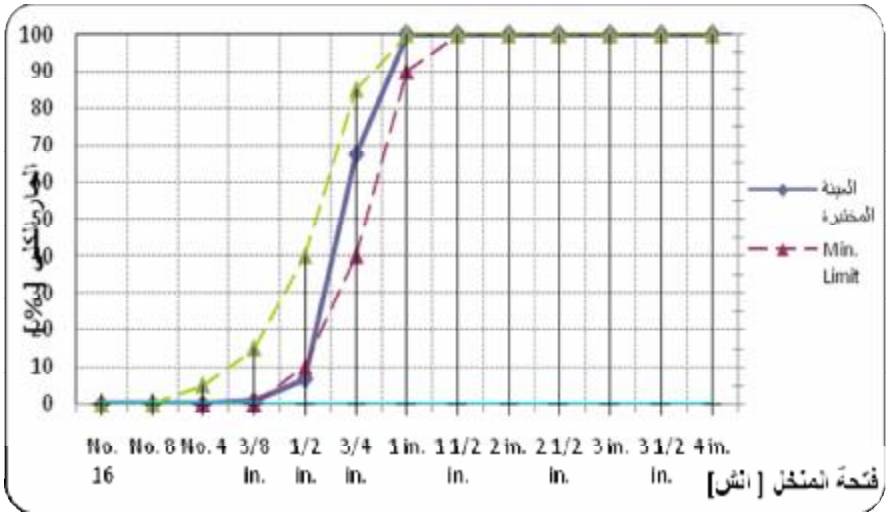
4-2- **تحديد مواصفات الحصويات ومقارنتها بالمجالات المقبولة**:

حُدِّدَتِ الخواص المهمة للحصويات اللازمة لتصميم الخلطة البيتونية وفق ASTM-C127. وكانت نتائج الاختبارات لكل من البحص والرمل مبيّنة في الجدول (1):

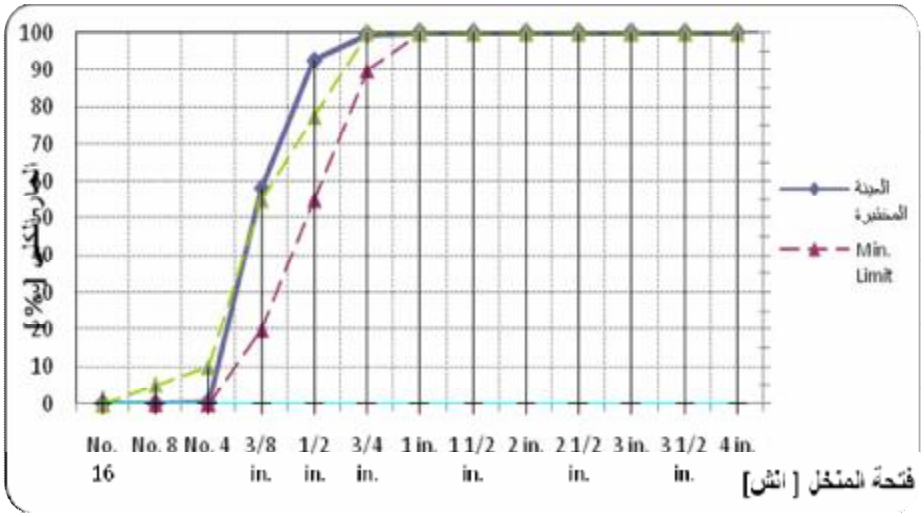
الجدول (1) مواصفات الحصويات وخصائصها

العينة	الوزن الحجمي t/m^3	الوزن النوعي t/m^3	نسبة الامتصاص %
بحص فولي	1.805	2.817	0.54
بحص عدسي	1.795	2.797	0.75
رمل صب	1.707	2.710	1.02
رمل مزار	1.582	2.560	0.55

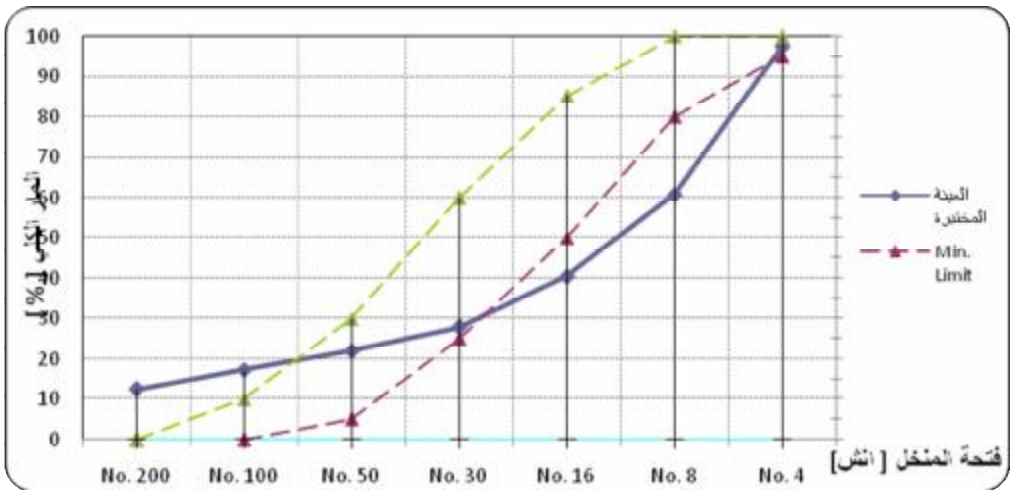
كما أُجْرِيَت اختبارات التدرج الحبي لأنواع الحصويات المختلفة وفق (ASTM-C33) وقُورِنَتْ بالمجالات المقبولة، وكانت منحنيات التدرج الحبي والمجالات المقبولة لعينات البحص مبيّنة في الشكل (1)، ولعينات الرمل في الشكل (2).



أ- التدرج الحبي لعينة البحص الفولي

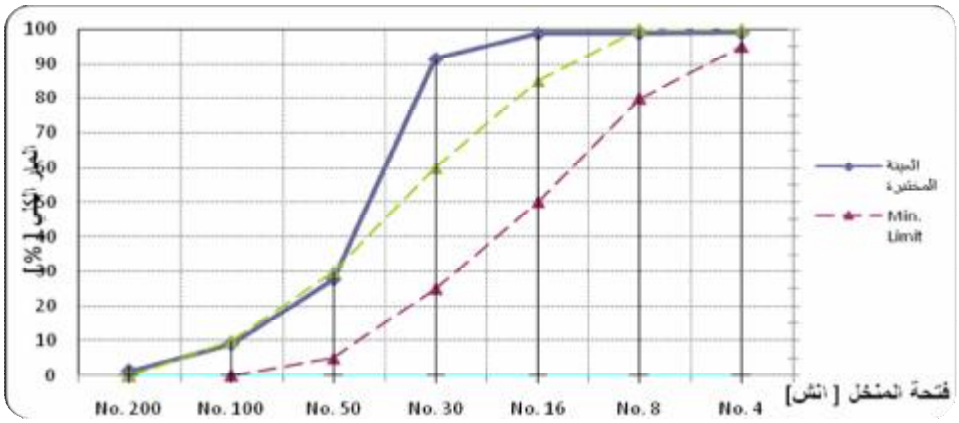


ب- التدرج الحبي لعينة البحص العدسي



أ- التدرج الحبي لعينة رمل الصب

الشكل (1) التدرج الحبي لعينات البحص



ب- التدرج الحبي لعينة رمل المزار

الشكل (2) التدرج الحبي لعينات الرمل

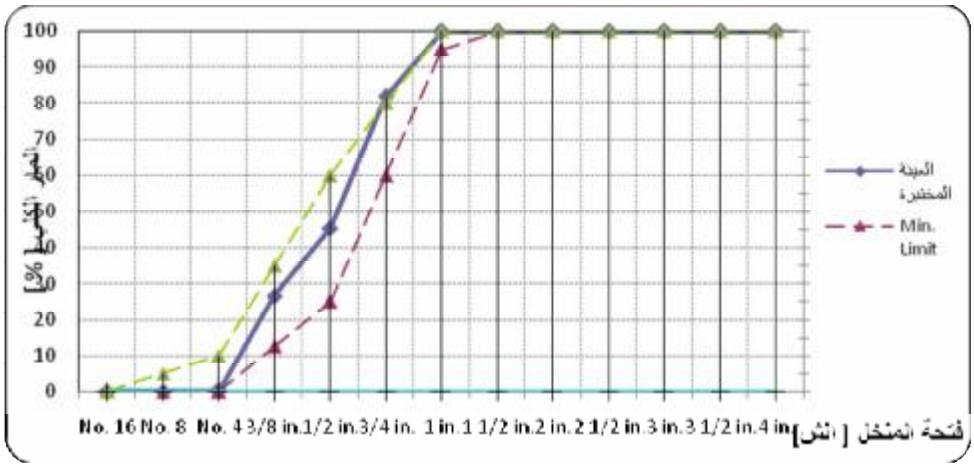
من المخططات السابقة نجد أن الحصويات غير واقعة ضمن المجالات المقبولة، ولابدَّ من تنسيبها ومزجها لتقع ضمن المجالات المقبولة.

4-3- مزج الحصويات:

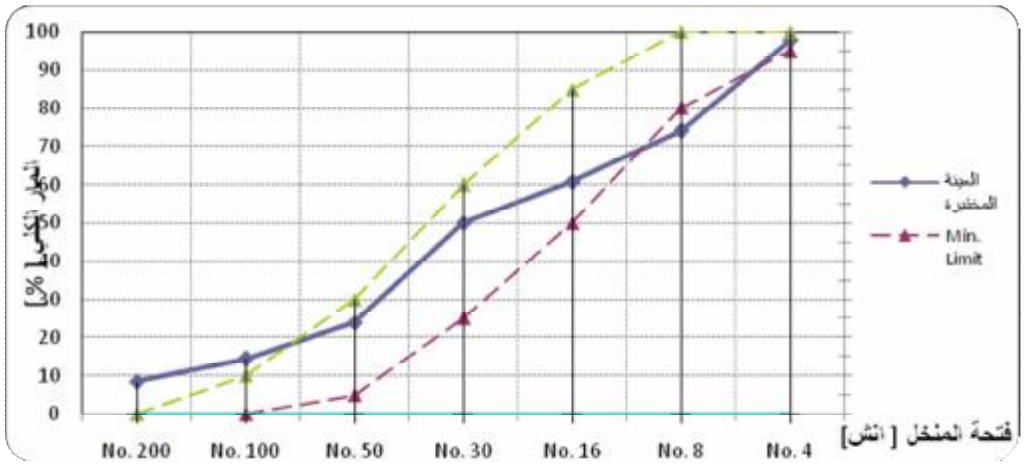
قمنا بمزج كل من نوعي البحص والرمل بنسب معينة لتحقق التدرج الحبي المقبول لكل منها، ويبيّن الشكل (3) التدرج الحبي لكل من البحص والرمل الخليط، وفق النسب الآتية:

البحص الخليط = .550 * البحص الفولي + 0.45 * البحص العدسي.

الرمل الخليط = .650 * رمل الصب + 0.35 * رمل المزار.



أ - التدرج الحبي للبحص الخليط



ب - التدرج الحبي للرمل الخليط

الشكل (3) التدرج الحبي لكل من البحص الخليط والرمل الخليط

4-4- مواصفات الإضافات:

تتميّز الإضافات المستخدمة (ألياف البولي بروبيلين المركبة – الألياف الزجاجية – بودرة السيليكافيوم) بالمواصفات والميزات المذكورة سابقاً، ويبيّن الشكل (4) الإضافات المستخدمة في الدراسة.

a) ألياف البولي بروبيلين المركبة

b) الألياف الزجاجية

c)بودرة السيليكافيوم

الشكل (4): شكل الألياف المستخدمة

4-5- تصميم الخلطة البيتونية:

اِعتُمِدَتِ الطريقة الأمريكية ACI 211.1-91 في تصميم الخلطة البيتونية بمقاومة اسطوانية مميزة مقدارها 22 MPa باستخدام الإحضارات المختبرة والمحددة مواصفاتها سابقاً وباستخدام الإضافات الموصفة وصُمِّمَتْ عدة نماذج للخلطات:

a خلطة عادية (دون رمل مازار).

b خلطة عادية مع ألياف بولي بروبيلين بنسبة 0.6 Kg/m^3.

c خلطة عادية مع ألياف زجاجية بنسبة 0.6 Kg/m^3.

d خلطة عادية مع بودرة السيليكافيوم بنسبة (10% من وزن الاسمنت) $0.1*C\ kg/m^3$.

e خلطة مع رمل مازار.

f خلطة مع رمل مازار وألياف بولي بروبيلين بنسبة 0.6 Kg/m^3.

g خلطة مع رمل مازار وألياف زجاجية بنسبة 0.6 Kg/m^3.

h خلطة مع رمل مازار وبودرة السيليكافيوم بنسبة (10% من وزن الاسمنت) $0.1C\ kg/m^3$.

وكانت كمية المواد اللازمة للمتر المكعب الواحد من الخلطة مبيّنة في الجدول (2).

الجدول (2) جدول تصميم الخلطات

الخلطة	اسمنت Kg/m^3	البحص الفولي Kg/m^3	البحص العدسي Kg/m^3	رمل الصب Kg/m^3	رمل المزار Kg/m^3	الماء Kg/m^3	بولي بروبيلين Kg/m^3	زجاجية Kg/m^3	سيليكافيوم Kg/m^3
a	350	364.20	445.13	989.18	----	193.67	----	----	----
b	350	364.20	445.13	989.18	----	193.67	0.6	----	----
c	350	364.20	445.13	989.18	----	193.67	----	0.6	----
d	350	364.20	445.13	989.18	----	193.67	----	----	35
e	350	366.25	446	739.17	247.08	193.67	----	----	----
f	350	366.25	446	739.17	247.08	193.67	0.6	----	----
g	350	366.25	446	739.17	247.08	193.67	----	0.6	----
h	350	366.25	446	739.17	247.08	193.67	----	----	35

4-6- اختبار العينات على الضغط:

صُبَّت 12 عينة مكعبية mm 150*150*150 لكل من الخلطات السابقة (96 عينة)، وحفظت في ظروف المخبر وفقاً للشروط النظامية بحسب ASTM-C39 وكسرت بعد 28 يوماً، فكانت قوة الكسر لكل منها N.

ومنها حُسِبَتِ المقاومة المكعبية من العلاقة الآتية:

$$\sigma = N/A \quad [4]$$

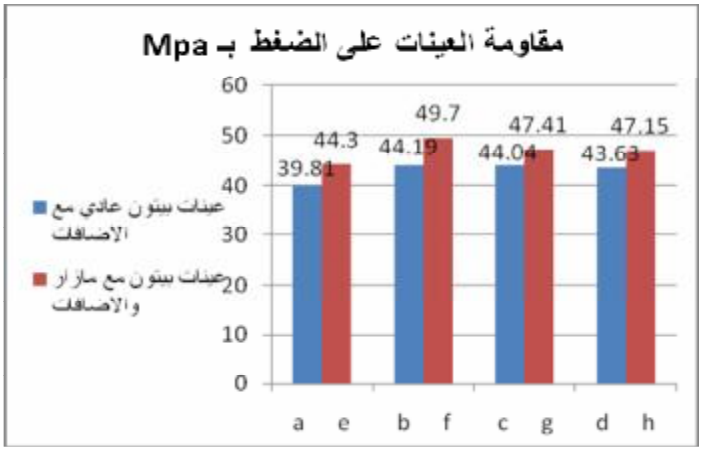
إذْ A مساحة المقطع العرضي للعينة.

المقاومة المكعبية المتوسطة وفق نماذج الخلطات المدروسة (12 عينة لكل خلطة) مبيّنة في الجدول (3)

الجدول (3) جدول مقاومات الخلطات البيتونية المدروسة

الخلطة	المقاومة المكعبية المتوسطة على الضغط MPa	مقاومة البيتون على الشد الناجم عن الانعطاف MPa	مقاومة البيتون على الشد الناجم عن الفلق MPa
a	39.81	2.88	1.89
b	44.19	3.18	2.04
c	44.04	3.07	1.98
d	43.63	3.01	1.95
e	44.30	2.96	1.92
f	49.70	3.24	2.07
g	47.41	3.12	2.03
h	47.15	3.13	2.04

كما يظهر الشكل (5) مخططاً يبيّن نسبة اختلاف مقاومة الضغط لنماذج الخلطات الثماني المدروسة.

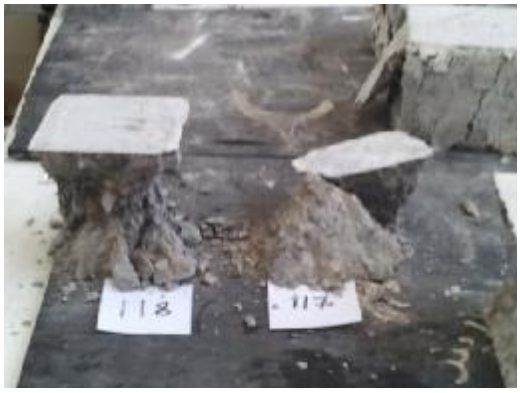


الشكل (5) مقاومة العينات على الضغط

ويبيّن الشكل (6) شكل انهيار العينات المختبرة على الضغط لكل من العينات دون إضافة والعينات مع كل نوع من أنواع الإضافات، إذْ نلاحظ أن وجود أليـاف البولي بروبيلين (العينة 105) يجعل العينـة تحـافظ على شكلها الأصلي بعد الانهيار. أمَّا العينات الأخرى فقد أظهرت شكلاً متشابهاً لموشور الانهيار فيما كانت مكونات العينة مع بودرة السيليكافيوم مفتته.

a)العينة البيتونية دون إضافات

b) العينة البيتونية مع ألياف بولي بروبيلين



c) العينة البيتونية مع الألياف الزجاجية

d) العينة البيتونية مع بودرة السيليكافيوم

الشكل (6): شكل انهيار العينات على الضغط بحسب نوع الإضافة

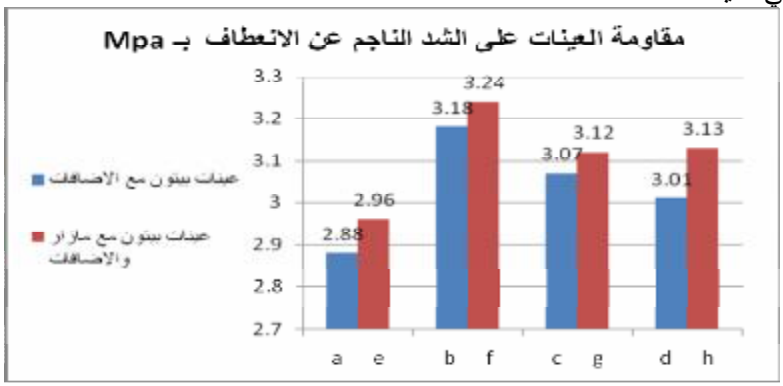
4-7- اختبار العينات على الشد الناجم عن الانعطاف:

صُبَّتْ 6 عينات موشورية mm 400*100*100 لكل من الخلطات السابقة(48 عينة) وفق ASTM-C348، وكسرت تحت تأثير تعرضها لقوة مركزة P في منتصف المجاز، وحُسِبَ إجهاد الشد للبيتون على الانعطاف من العلاقة[4]:

$$F_{cb} = 0.9\ PL/b^3$$

إذْ L مجاز العينة و b عرض المقطع العرضي للعينة.

وكانت مقاومة البيتون على الشد الناجم عن الانعطاف الوسطية وفق نماذج الخلطات المدروسة (6 عينات لكل خلطة) مبيّنة في الجدول (3)، كما يظهر الشكل (7) مخططاً يبيّن نسبة اختلاف مقاومة البيتون على الشد الناجم عن الانعطاف لنماذج الخلطات الثماني المدروسة.



الشكل (7) مقاومة العينات على الشد الناجم عن الانعطاف

ويبيّن الشكل (8) شكل الانهيار للعينات المختبرة على الشد الناجم عن الانعطاف، إذْ نلاحظ أن ألياف البولي بروبيلين تحافظ على شكل العينة عند الانهيار أمَّا باقي العينات فتنهار بالشكل نفسه مع اختلاف في قيمة إجهاد الانهيار تبعاً لنوع الإضافة ودورها في الربط بين مكونات الخلطة البيتونية.

a) العينة البيتونية دون إضافات

b) العينة البيتونية مع ألياف البولي بروبيلين

c) العينة البيتونية مع الألياف الزجاجية

d) العينة البيتونية مع بودرة السيليكافيوم

الشكل (8): شكل انهيار العينات على الشد الناجم عن الانعطاف

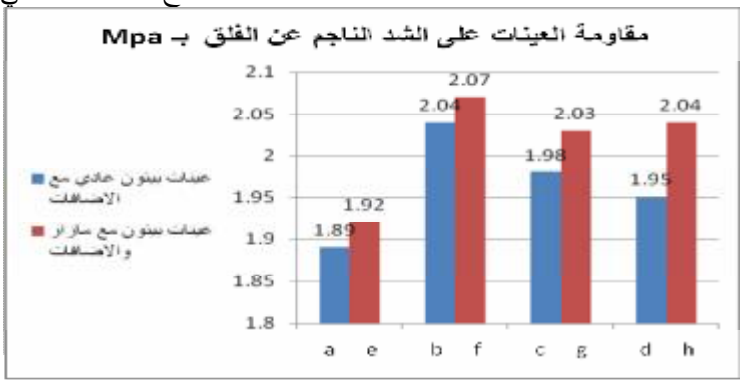
4-8 - اختبار العينات على الشد الناجم عن الفلق:

صُبَّتْ 6 عينات اسطوانية mm 300*150 لكل من الخلطات السابقة (48 عينة) وفق ASTM-C496، وكسرت تحت تأثير تعرضها لقوة موزعة p مطبقة على جانبي العينة طولياً. ومنها حُدِّدَ إجهاد الشد للبيتون على الفلق من العلاقة[4]:

$$F_{ct} = 0.55\ p\ /dL$$

إذْ p شدة الحمولة الموزعة و L مجاز العينة و d قطر العينة.

وكانت مقاومة البيتون على الشد الناجم عن الفلق الوسطية وفق نماذج الخلطات المدروسة(6 عينات لكل خلطة) مبيّنة في الجدول (3)، كما يظهر الشكل (9) مخططاً يبيّن نسبة اختلاف مقاومة البيتون على الشد الناجم عن الانعطاف لنماذج الخلطات الثماني المدروسة.



الشكل (9) مقاومة العينات على الشد الناجم عن الفلق

كما يبيّن الشكل (10) شكل انهيار العينات على الشد الناجم عن الفلق، ويظهر تأثير ألياف البولي بروبيلين في الحفاظ على الارتباط بين نصفي العينة المنهارة على الفلق خلافاً لشكل الانهيار للعينات الأخرى.

a) العينة البيتونية دون إضافات

b) العينة البيتونية مع ألياف البولي بروبيلين

c) العينة البيتونية مع الألياف الزجاجية

d) العينة البيتونية مع بودرة السيليكافيوم

الشكل (10): شكل انهيار العينات على الشد الناجم عن الفلق

5 - نتائج البحث:

1- حافظت العينات البيتونية مع ألياف البولي بـــروبيلن على شكل العينة الأصلي عند الانهيار على خلاف باقي العينات البيتونية دون إضافات والعينات البيتونية مع كل من الألياف الزجاجية أو بودرة السيليكافيوم، وذلـــك لأنَّ ألياف البولي بروبيلين قامت بالربط بين مكونات البيتون وتكوين نسيج ربط داخلي يحافظ علـــى قـــوام البيتـــون المنهار وعدم تفتيته.

2- إن استخدام ألياف البولي بروبيلين بنسبة$0.6kg/m^2$ رفع مقاومة البيتون على الضغط بنسبة راوحـــت بـــين 10-13%، وازدادت مقاومة البيتون على الشد النـــاجم عن الانعطاف بنسبة راوحت بين 9-11% فيما ازدادت مقاومة الانعطاف الناجم عن الفلق بنسبة راوحـــت بـــين 7- 9 %.

3- إن استخدام الألياف الزجاجية بنـــسبة $0.6\ kg/m^2$ رفع مقاومة البيتون على الضغط نحو7-11%، وازدادت مقاومة البيتون على الشد الناجم عن الانعطـــاف بنـــسبة راوحت بين % 5-7 في حين ازدادت مقاومة الانعطاف الناجم عن الفلق بنسبة بين % 4-6.

4- إن استخدام بودرة السيليكافيوم بنسبة 10% من وزن الاسمنت في الخلطات البيتونية رفع من مقاومتها علـــى الضغط بنسبة راوحت بين 6-10%، ورفع من مقاومـــة البيتون على الشد الناجم عن الانعطاف بنسبة وصلت إلى 4-6% في حين وصلت مقاومة الشد الناجم عن الفلـــق إلى نسبة % 3- 6.

5- إن تعديل الرمل باستخدام رمل المـــزار رفـــع مـــن مقاومة البيتون على الضغط بين 7-13%، كما رفع من مقاومة البيتون على الشد الناجم عن الانعطاف أو الفلـــق لنسبة لم تتجاوز 4%.

6- إن استخدام ألياف البولي بروبيلين في البيتون مقارنة بالإضافات الأخرى المستخدمة في البحـــث يزيـــد مـــن مقاومة البيتون على الضغط والشد بنسبة جيدة ومقبولة، كما يحافظ على شكل العينات ويخفـــف مـــن الأضـــرار الناجمة عن تفتت البيتون.

7- ينصح بإضافة ألياف البولي بـــروبيلين فـــي تنفيـــذ البيتون مسبق الصنع، وفي تنفيذ البيتون دون مـــضخة؛ وذلك بسبب تماسك البيتون الناتج.

المراجع*

1- The Chemical Company, "Adding Value to concrete"-Monofilament polypropylene fibers for cementitious systems, 09/99 BASF_CC-UAE, 02/2007
2- Sodamco Company, "Admixtures & Concrete Related Products", Edition: 03/10-A-2010.
3- The Chemical Company, "Adding Value to concrete"-Densified silica for concrete, 06/96
BASF_CC-UAE, 05/2006
4- Syrian Arab Code, Engineering Union, 3ed Education, Damascus 2004.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2012/11/8