

دراسة سلوك البيتون عالي المقاومة المصنع باستخدام المواد المحلية ومخطط الإجهادات المكافئ

الدكتور أحمد عبود*

الدكتور نزيه منصور**

بسام شعل***

(تاريخ الإيداع 2 / 11 / 2015. قُبل للنشر في 4 / 4 / 2016)

□ ملخص □

يتضمن هذا البحث دراسة تجريبية لسلوك البيتون عالي المقاومة وذلك بهدف تقييم منحنى الإجهاد - التشوه ($\sigma - \epsilon$) للبيتون عالي المقاومة واستنباط معاملات مخطط إجهادات الضغط المكافئ التي سنعتمدها في تصميم العناصر البيتونية المصنعة من البيتون عالي المقاومة. لهذه الغاية تم تحضير عدد من العينات الاسطوانية بمقاومة 60MPa حيث أُختبرت هذه العينات على الضغط، وتم الحصول من خلال نتائج الاختبارات على منحنى الإجهاد - التشوه ($\sigma - \epsilon$). أظهرت النتائج إمكانية تصنيع البيتون عالي المقاومة من المواد المحلية وبمقاومات أعلى من المقاومة التي حصلنا عليها، وتبين من المخططات الناتجة أن منحنى ($\sigma - \epsilon$) للبيتون عالي المقاومة مرن بشكل خطي جوهرياً لحد الانهيار مع هبوط أكثر انحداراً للجزء الهابط من المنحنى وهذا ما يتوافق مع نتائج الأبحاث العالمية، كان الانهيار تقريباً فجائياً وسريعاً مع زيادة مقاومة البيتون وهذا يدل على أن البيتون عالي المقاومة أقل مطاوعة عند الانهيار من البيتون العادي. يختلف منحنى ($\sigma - \epsilon$) للبيتون عالي المقاومة عن منحنى ($\sigma - \epsilon$) للبيتون العادي وهذا يؤثر على خصائص الشكل المستطيل لمخطط الإجهاد المكافئ مما يتطلب إدخال تعديلات على المعاملات تؤدي إلى تمثيل لمخطط الإجهادات المكافئ تمثيلاً أقرب للمنحنى الحقيقي، وبتقييم منحنى ($\sigma - \epsilon$) للعينات المختبرة وجدنا أن المخطط يأخذ شكل شبه منحرف (بمقاومة $f'_c = 60MPa$) قيمته في الأعلى $\alpha_1 f'_c$ وارتفاع مخطط الضغط x ، وتم استنتاج قيمة المعاملين α_1 و β_1 (α_1 هو متوسط إجهاد الضغط / المقاومة المميزة، β_1 هو نسبة من الارتفاع الفعال الذي يحدد موقع مركز محصلة الضغط)، حيث $\alpha_1 = 0.75$ و $\beta_1 = 0.65$ وفي حال زيادة المقاومة للبيتون عن ($f'_c \geq 80MPa$) فإن شكل المخطط يكون أقرب للشكل المثلثي منه للشكل شبه المنحرف، وفي هذه الحالة نجد أن منحنى ($\sigma - \epsilon$) يأخذ شكلاً مثلثياً قيمته في أعلى المثلث f'_c وارتفاع مخطط الضغط x وبتحويل مخطط الإجهادات المثلثي إلى مخطط الإجهادات المستطيل استنتجنا أن $\alpha_1 = 0.85$ و $\beta_1 = 0.65$.

الكلمات المفتاحية: بيتون عالي المقاومة، مقاومة الضغط، منحنى الإجهاد - التشوه، مخطط إجهادات الضغط.

* أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** مدرس - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالب ماجستير - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Study of Behaviour of High Strength Concrete Produced from Local Materials and Equivalent Compressive Stress Block

Dr. Ahmad Abboud*
Dr. Nazih Mansour**
Bassam Shaafal***

(Received 2 / 11 / 2015. Accepted 4 / 4 / 2016)

□ ABSTRACT □

This research presents an experimental study behaviour of high strength concrete, for evaluation of stress - strain curve ($\sigma - \varepsilon$) and derivation of factors of equivalent compressive stress block, we depend it in design of high strength concrete elements.

For this purpose, number of cylinders specimens with strength 60 MPa were prepared and tested in compression, then ($\sigma - \varepsilon$) curve was obtained.

The results showed the possibility of producing high strength concrete from local materials and with strengths are highest than those were obtained, the resulting diagrams of ($\sigma - \varepsilon$) curve are shown to be essentially linearly elastic up to failure with a steeper declining portion of the stress - strain diagram, which agree with the results of global researches, the failure was almost sudden and rapid with increasing strength which shows that the high-strength concrete less ductile than normal concrete at the failure. ($\sigma - \varepsilon$) Curve of high strength concrete differs from that normal concrete, this affects on the properties of rectangular equivalent stress block which requires modifications on the factors led to optimum represent for it and with evaluation of ($\sigma - \varepsilon$) curve of the tested specimens, the diagram takes a trapezoidal shape ($f'_c = 60MPa$), its value at the top is $\alpha_1 f'_c$ and the depth of the compressive block is x and we found $\alpha_1 = 0.75$ and $\beta_1 = 0.65$ (α_1 is average compression/cylinder compressive strength of concrete, β_1 is ratio of the active depth that defined location of compression force center), when concrete strength increases up ($f'_c \geq 80MPa$), the diagram shape will be closer to triangular than trapezoidal and then curve takes the shape of triangle its value at the top is f'_c and the depth is x and with replacing triangular diagram to rectangle we found $\alpha_1 = 0.85$ and $\beta_1 = 0.65$.

Keywords: High - Strength Concrete, Compressive Strength, Stress - Strain Curve, Compressive Stress Bloc.

* Professor, Department of Structure Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Assistant Professor, Department of Structure Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate Student , Department of Structure Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة :

يعتبر البيتون عالي المقاومة مادة جديدة في صناعة البيتون تطورت بشكل تدريجي لعدة سنوات. ومع التطور الحاصل بمرور الزمن فقد تغيرت كذلك المفاهيم المتعلقة به. ففي الخمسينات كان البيتون ذو المقاومة 34 MPa يعتبر بيتون عالي المقاومة، وفي الستينات أستخدم البيتون ذو المقاومة $41-52 \text{ MPa}$ بشكل تجاري وفي السبعينات أنتج البيتون ذو المقاومة 62 MPa ، وحديثاً تم الوصول إلى مقاومات بحدود 140 MPa . ونظراً لتزايد أهمية البيتون عالي المقاومة في السنوات الماضية واتساع سوق انتاجه واستعماله في شتى أنواع التطبيقات والمنشآت الهندسية والناج عن التطور الكبير في تكنولوجيا صناعة ومعالجة المواد وكذلك التزايد في طلب مقاومات أعلى فقد هدفنا من خلال هذا البحث إلى توضيح إمكانية صنع البيتون عالي المقاومة باستعمال المواد المحلية وتحديد خواصها وسلوكها، واستنتاج معاملات مخطط الإجهادات المكافئ التي تساعد على حساب هذه المقاومات.

في الوقت الحالي لم يستخدم البيتون عالي المقاومة بشكل واسع، ولم يعد صنعه اليوم تحدياً، ولكن تكمن الصعوبة في تغيير عادات البناء لدى المهندسين والمتعهدين واقناعهم باستعمال هذا النوع من البيتون.

وكتعريف: يمكن القول أن البيتون عالي المقاومة هو بيتون ذو مسامية قليلة ناتجة عن الاستخدام القليل للماء بحيث تتقارب حبيبات الإسمنت والإضافات الاسمنتية من بعضها البعض بشكل أكبر مما هو في البيتون العادي.

العوامل الاساسية المؤثرة في تصميم البيتون عالي المقاومة:

1. نوعية الإسمنت المستعمل وكميته: الإسمنت يجب أن يكون عالي الجودة وأن يكون متوافق مع أي إضافات مستخدمة. ولقد وجد أن النسبة المثلى التي تعطي أكبر مقاومة للبيتون تقع بين $450 - 500 \text{ kg/m}^3$ (من أجل أسمنت صنف 42.5) ويعتمد ذلك على خصائص وكميات ونسب باقي المكونات وعمّا إذا كانت الخلطة تحتوى على مادة غبار السليكا أم لا.
2. نسبة الماء إلى الإسمنت: تعتبر هذه النسبة أهم عامل في تحديد مقاومة البيتون، والحفاظ على هذه النسبة منخفضة وثابتة هو العامل الأكثر أهمية في نجاح عملية الإنتاج.
3. نوعية الحصى وقابليتها للتلاصق مع المونة الاسمنتية: يجب أن يكون البحص قوى ومتمين لأنه يعمل كعامل يحدد مقاومة البيتون القصوى حيث أن الشروخ في حالة البيتون عالي المقاومة تمر خلال حبيبات البحص الكبيرة وليس حولها كما في حالة البيتون العادي. بالنسبة للرمل يجب أن يكون خشن نوعاً ما حيث يكون معامل النعومة له من 2.8 إلى 3 وذلك لأن الخلطة تكون غنية بالمواد الناعمة مثل الأسمنت وغبار السليكا إن وجدت.
4. نوع الإضافات المختارة: تعتبر الملدنات Superplasticizers أهم مكون للحصول على بيتون عالي المقاومة حيث بواسطتها نستطيع خفض نسبة ماء الخلط إلى 0.25 من وزن الأسمنت فقط وبالتالي يمكننا الحصول على أعلى مقاومة. أما غبار السليكا Silica fume فهي تعمل على سد الفجوات (الفراغات) الداخلية والمسام الشعرية وبالتالي زيادة المقاومة وتحسين النفاذية. وعموماً فإن الزيادة في مقاومة الضغط بتأثير مادة غبار السليكا قد لا تتجاوز 20%. تتراوح نسبة غبار السليكا بشكل عام من 5% إلى 20% من وزن الأسمنت^[3].
5. طريقة الخلط والنقل والصب والمعالجة وجودتها : توجد شروط إضافية أخرى متعلقة بـ: عامل المرونة modulus of elasticity، مقاومة الشد والانعطاف flexural and tensile strengths، حرارة التميّه heat of hydration، الزحف والانكماش creep and drying shrinkage، النفاذية permeability، زمن

تحضير الخلطة time of setting، طريقة الصب method of placement، وقابلية التشغيل workability وغيرها قد تؤثر على اختيار مواد ونسب الخلطة .

أهمية البحث وأهدافه:

الهدف من هذا البحث تحقيق ما يلي:

-إنتاج بيتون عالي المقاومة مُصنع من مواد محلية.

-دراسة خواص وسلوك هذا البيتون من خلال دراسة مخطط تغير الإجهاد - التشوه ($\sigma - \epsilon$).

-تقييم مخطط إجهاد الضغط المكافئ من أجل إدخال بعض المعاملات التي تأخذ بالحسبان البيتون عالي

المقاومة للوصول لمخطط الإجهادات المكافئ الأمثل (optimum).

نظراً لتزايد أهمية البيتون عالي المقاومة في السنوات الماضية واتساع سوق إنتاجه واستعماله في شتى أنواع التطبيقات والمنشآت الهندسية والناج عن التطور الكبير في تكنولوجيا صناعة ومعالجة المواد، فإن أهمية هذا البحث تكمن في توطين هذه المادة محلياً و المساهمة في استنتاج المعاملات والبارامترات الخاصة بالبيتون عالي المقاومة واقتراح إدخال نتائج هذا البحث في الكود العربي السوري.

طرائق البحث ومواده:

تم تصميم خلطة بيتونية عالية المقاومة (60 MPa) وذلك تبعاً لعيار الإسمنت (صنف 42.5) المستعمل ونسب الحصى والخشنة والناعمة ونسبة الماء إلى الإسمنت. حيث تم تصميم عدة خلطات بعدد كبير من العينات واختبارها للوصول إلى المقاومة المطلوبة ومن ثم تحضير 9 عينات أسطوانية نظامية بأبعاد (30×15)cm. قمنا بإجراء سلسلة التجارب في مخبر كلية الهندسة المدنية في جامعة تشرين، وتم اختبار 3 من العينات بعمر 7 أيام بهدف معرفة تطور المقاومة مع الزمن وتم اختبار بقية العينات بعمر 28 يوم. تم اختبار ثلاث عينات باستخدام جهاز قياس التشوه من أجل الحصول على مخططات الإجهاد - التشوه وست أخرى بواسطة جهاز قياس الضغط البسيط للحصول على شكل الانهيار بشكل واضح.

موصفات المواد المكونة للخلطة:

استخدمت المواد المحلية التالية:

-حصى خشنة (بحص حسياء $D_{max}=12.5mm$).

-حصى ناعمة (رمل صنوبر جبلة أسود $D_{max}=1.18mm$ ورمل حسياء خشن $D_{max}=9.5mm$).

-اسمنت بورتلاندي (اسمنت محلي إنتاج القطاع الخاص) صنف 42.5.

-ماء صالح للشرب محقق للشروط الفنية.

-ملدن superplasticizer يسمى (Flocrete SP90) يطابق مواصفات ASTM C494 type B, D

and G لتحسين قابلية التشغيل وزيادة المقاومة المبكرة.

-سليكا فيوم Silica Fume للحصول على خلطة بيتونية عالية المقاومة.

أُجريت عدة اختبارات لتحديد خواص المواد المستخدمة طبقاً للمواصفات القياسية (ASTM) وقورنت النتائج

مع الحدود المعطاة في هذه المواصفات.

الحصويات الخشنة Coarse Aggregates:

استخدم بحص حسياء بقطر أعظمي 12.5 mm وفق الشكل (1) حيث تبقت نسبة قليلة أكبر من 12.5mm لم يتم نخلها وبالتالي يمكن اعتبار القطر الأعظمي هو 12.5 mm، يوضح الشكل (2) منحنى التدرج الحبي للبحص المستخدم. وتوضح الجداول (1) ، (2) الخصائص والتدرج الحبي للبحص المستخدم على الترتيب.



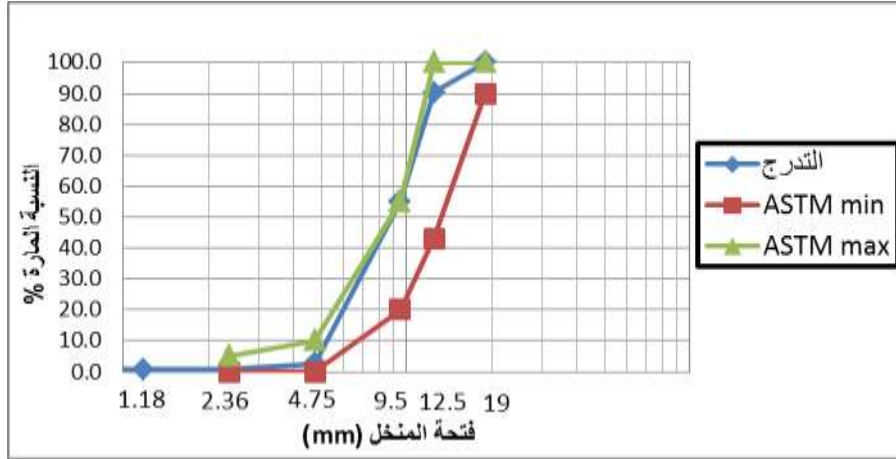
الشكل (1) بحص حسياء المستخدم في التجارب

الجدول (1) الخصائص الرئيسية للبحص المستخدم

الخاصية	بحص حسياء
القطر الأعظمي Maximum nominal size (mm)	12.5
الاهتراء Los Angeles (%)	15.6
الوزن الحجمي Dry volume weight (Kg/m ³)	1573
الوزن النوعي Specific gravity	2.68

الجدول (2) التدرج الحبي لبحص حسياء

فتحة المنخل (mm)	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.075
النسبة المئوية المارة %	100	90.4	55.1	2.6	0.9	0.8	0.6



الشكل (2) منحنى التدرج الحبي للبحص المستخدم

الحصويات الناعمة Fine Aggregates:

تم استخدام خليط من المواد الناعمة هو عبارة عن رمل أسود بقطر أعظمي 1.18 mm ورمل خشن بقطر أعظمي 9.5 mm وفق الشكل (3)، معامل النعومة للخليط (رمل أسود + رمل خشن) 2.29، وتوضح الأشكال (4A)، (4B، 4C، 4D) منحنيات التدرج الحبي للرمال الأسود والخشن والخليط (رمل أسود + خشن) والخليط النهائي للحصويات (بحص، رمل) على الترتيب. ويبين الجدول (3) الخصائص الأساسية للمواد الناعمة والجدول (4A، 4B، 4C) التدرج للرمال الأسود والرمل الخشن والخليط على التوالي، للاستئناس تم مقارنة التدرج الحبي للخليط النهائي (بحص + رمل) مع منحنيات التدرج الحبي النظامية الواردة في الكود العربي السوري بقطر أعظمي 19.1mm الموضح فيها مناطق الحزم النظامية A، B، C.



الشكل (3) الرمل المستخدم في التجارب

الجدول (3) الخصائص الرئيسية للرمال الأسود والرمل الخشن

رمل خشن	رمل أسود	الخاصية
9.5	1.18	القطر الأعظمي Maximum nominal size (mm)
3.65	1.7	معامل النعومة Fineness modulus
1460	1530	الوزن الحجمي Dry volume weight (Kg/m ³)
2.68	2.65	الوزن النوعي Specific gravity
73	87	المعادل الرملي (%)

الجدول (4A) التدرج الحبي للرمال الأسود

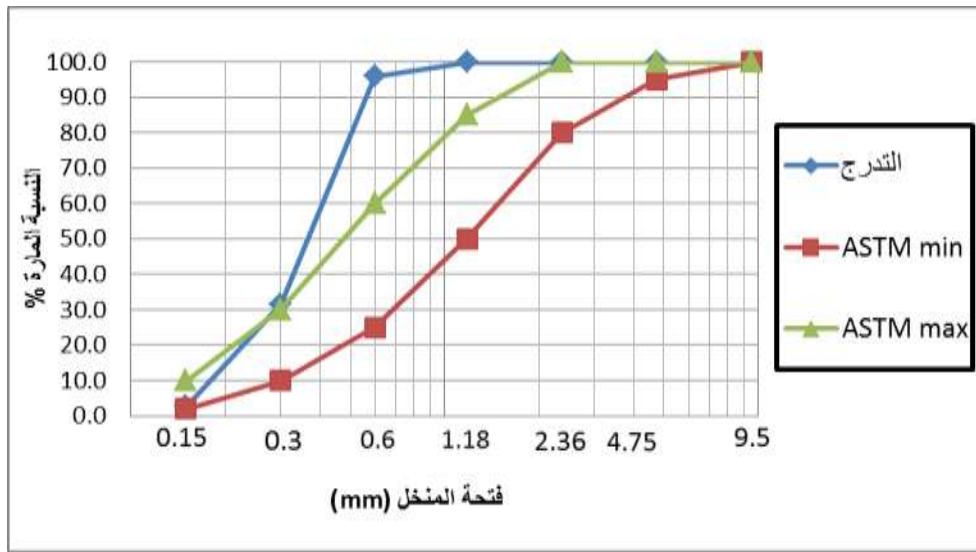
0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	فتحة المنخل (mm)
0.3	2.8	31.6	96	100	النسبة المئوية المارة %

الجدول (4B) التدرج الحبي للرمال الخشن

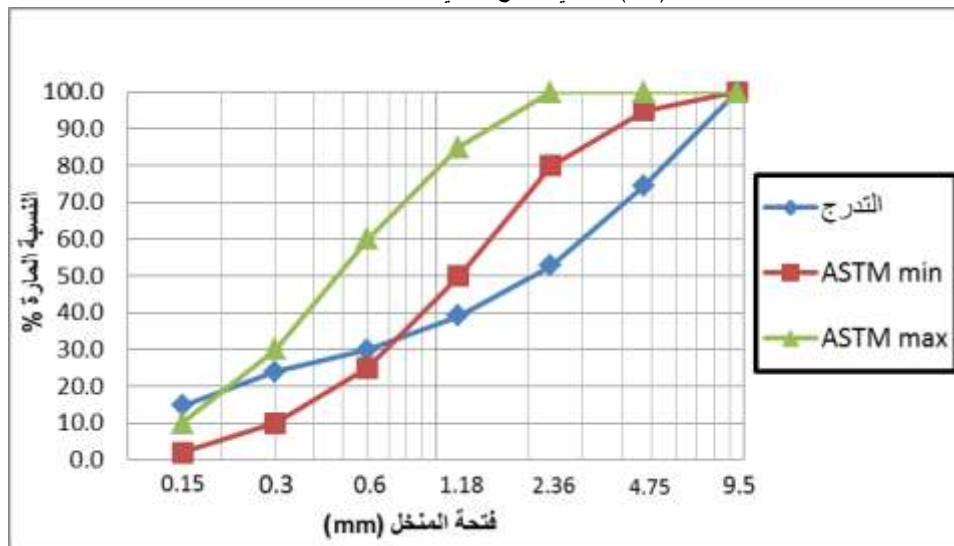
0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	فتحة المنخل (mm)
4.3	14.8	24	29.9	39.1	52.7	74.6	100	النسبة المئوية المارة %

الجدول (4C) التدرج الحبي للخليط (رمال أسود + رمل خشن)

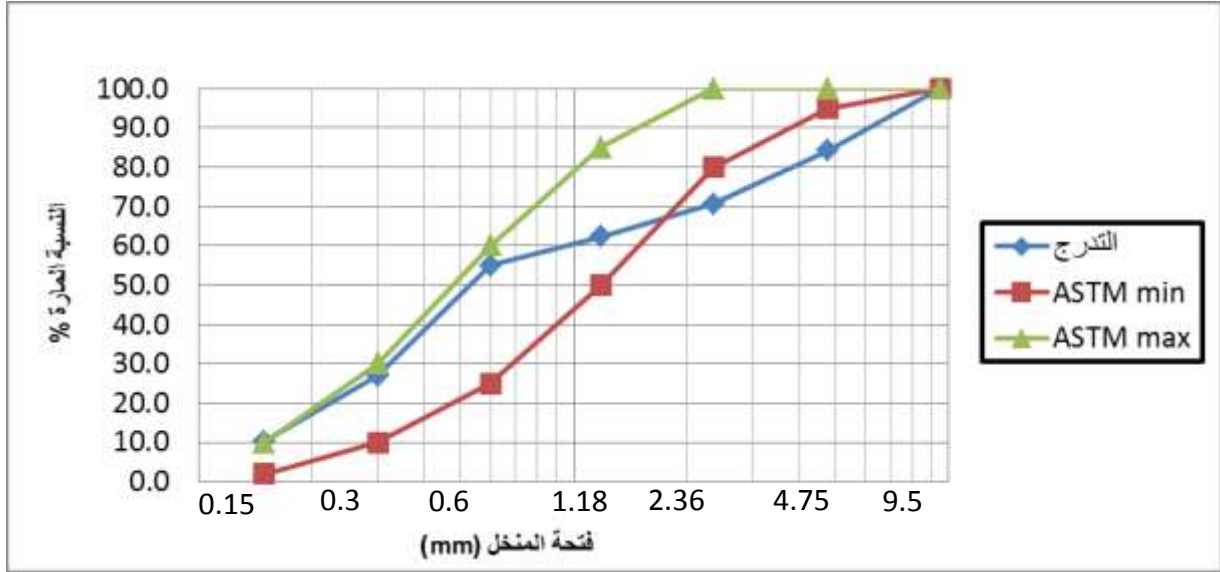
0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	فتحة المنخل (mm)
2.8	10.2	26.9	55	62.3	70.7	84.2	100	النسبة المئوية المارة %



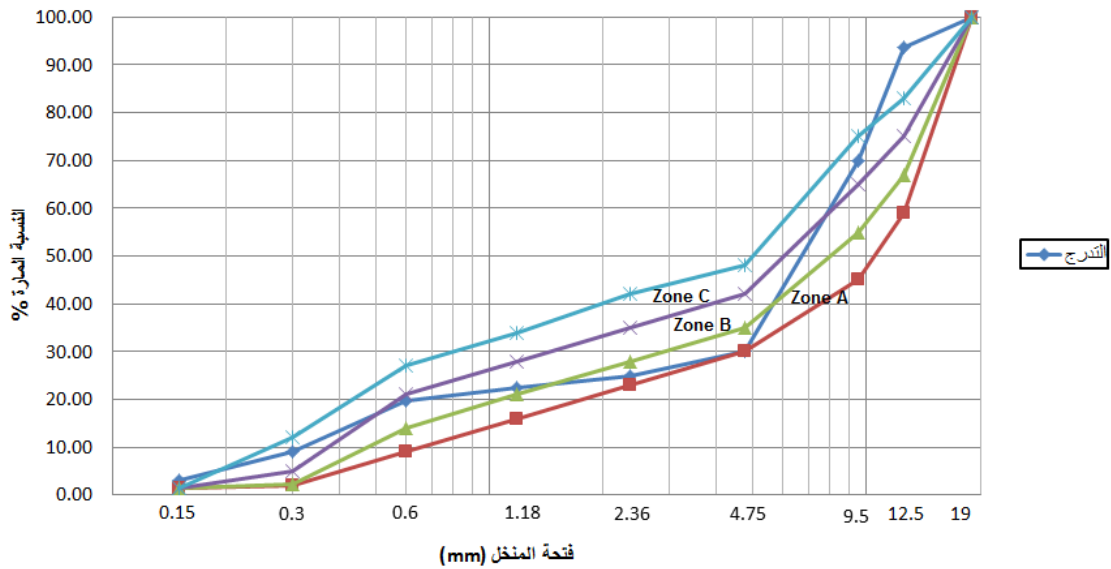
الشكل (4A) منحنى التدرج الحبي للرمال الأسود



الشكل (4B) منحنى التدرج الحبي للرمال الخشن



الشكل (4C) مقارنة نتائج التحليل الحبي للخليط (عينات من الرمل الأسود والخشن) مع الحزمة النظامية



الشكل (4D) مقارنة التدرج الحبي للخليط النهائي مع منحنيات التدرج الحبي للحصويات (الكود السوري) بمقاس اعتيادي أعظمي 19.1 مم

:الإسمنت Cement

استعمل اسمنت بورتلاندي (اسمنت محلي انتاج القطاع الخاص) صنف 42.5 يملك مقاومة ضغط في 28 يوم .60 MPa

:الماء Water

استخدم ماء صالح للشرب محقق للشروط الفنية. ويوضح الجدول (5) نتائج تحليل الماء المستخدم.

الجدول (5) نتائج تحليل الماء

PH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	القساوة	الخاصية
≈7	396-400 mg/l	63.90 ppm	25.92 ppm	43.2 ppm	87 ppm*	القيمة
-	≤ 1000SO ₃ (mg/l)	≤ 500 mg/l	≤ 2000 mg/l	≤ 2000 mg/l	-	القيم المسموحة [8,11]

part/million[ppm] = milligram/liter[mg/l] *

سليكا فيوم Silica Fume:

السليكا فيوم المستخدم في هذا العمل مُنتج من قبل شركة MAPEI ويوضح الجدول (6) الخصائص الفنية للسليكا فيوم .

الجدول (6) يوضّح البيانات التقنية (القيم النموذجية للسليكا فيوم)

TECHNICAL DATA (typical values) البيانات التقنية (قيم مثالية)	
PRODUCT IDENTITY تعريف المنتج	
Powder بودرة	القوام (Consistency)
Dark grey رمادي قاتم	اللون (Color)
600 (kg/m ³)	الكتلة /الحجم (Mass in pile)
Pozzolanic مادة بوزولانية	تأثير عملها الرئيس (Main action)
Filler مادة مائه	تأثير عملها الثانوي (Secondary action)
100	محتوى الأجسام الصلبة الجافة (Dry solids content) %

الملدنات Superplasticizers:

استخدم في هذا العمل التجريبي ملدن (Flocrete SP90) يطابق مواصفات ASTM C494 type B, D and G لتحسين قابلية التشغيل وزيادة المقاومة وخفض كمية الماء، ويوضح الجدول (7) الخصائص الفنية للملدن المستخدم.

الجدول (7) الخصائص الفنية للملدن المستخدم

الخاصية (property)	
brown liquid سائل غامق	اللون (color)
-2 ⁰ C تقريباً (-2 ⁰ C approximately)	درجة التجمد (freezing point)
1.17±0.01	الوزن النوعي (@25 ⁰ C) (specific gravity)
(Nil) صفر	محتوى الكلوريد (chloride content: BS5075)
المثالي أقل من 2% (typically less than 2%)	محتوى الهواء (air entrainment)

تصميم الخلطة البيتونية Concrete Mix Design:

تم تصميم الخلطة البيتونية وفق مواصفات الكود الأمريكي ACI 211.4R-93^[10]. ومن ثم ضبط الكميات للمواد وتحضيرها والخلط بشكل جيد وحرص جيد وبالتالي الحصول على المقاومة المطلوبة 60 MPa، ويوضح الجدول (8) نسب المواد المكونة للخلطة البيتونية.

الجدول (8) نسب الخلطة البيتونية

ملدن Superplasticizer kg/m ³	سليكا فيوم Silica fume kg/m ³	الماء Water kg/m ³	الحصويات الناعمة Fine Aggregate		الحصويات الخشنة Coarse Aggregate kg/m ³	اسمنت Cement kg/m ³
			رمل خشن kg/m ³	رمل أسود kg/m ³		
11	82.5	178	326	200	1070	462

النتائج والمناقشة:**أولاً النتائج التجريبية:**

(أ) النتائج التجريبية للمقاومة على الضغط بعمر 28 يوم:

تم كسر 3 من العينات بعمر 7 أيام و 6 بعمر 28 يوم وكانت نتائجها كما هو موضح في الجدول (9). ويوضح الشكل (5) العينات المصبوبة، بينما يوضح الشكل (6) شكل الانهيار للعينات حيث انهارت العينات بالضغط بشكل نظامي (مخروطي) وهو ما يتطابق مع الكودات العالمية.



الشكل (5) يوضح العينات الاسطوانية المصبوبة



(ب)

(أ)

الشكل (6): أ- عينات تم كسرها بجهاز قياس التشوهات بعمر 28 يوم ، ب- عينة تم كسرها بجهاز الضغط البسيط بعمر 28 يوم تعطى المقاومة المميزة (f'_c)، اعتماداً على مبادئ علم الإحصاء الرياضي، وباحتمال أن تكون نسبة 10 % من الاختبارات أقل من المقاومة المميزة، وذلك كما يلي:

$$f'_c = f'_{cm} - k \cdot s$$

$$f'_c = 61.648 - 1.44 \times 1.141 = 60.00 \text{ MPa}$$

الجدول (9) يوضح قيم المقاومة للعينات المختبرة بعمر 7 أيام وبعمر 28 يوم

رقم العينة	المقاومة بعمر 7 أيام (MPa)		المقاومة بعمر 28 يوم (MPa)	
	قوة الكسر (kN)	المقاومة (MPa)	قوة الكسر (kN)	المقاومة (MPa)
1	856.18	48.45	-	-
2	892.41	50.50	-	-
3	870.32	49.25	-	-
4	-	-	1095.6	61.99
5	-	-	1117.214	63.22
6	-	-	1100.578	62.28
7	-	-	1073.556	60.75
8	-	-	1060.288	60.00
9	-	-	1089.445	61.65

(ب) نتائج قياس معامل المرونة للبيتون Eco:

تم قياس معامل المرونة بـ MPa بأخذ قيم الإجهاد - التشوه حتى 40 % تقريباً من مقاومة العينة [1] وكانت النتائج كما هو مبين في الجدول الآتي، حيث تم حساب معامل المرونة وفق العلاقة التالية: $E_c = \frac{\sigma_{0.4}}{\epsilon_{0.4}}$ ويوضح الجدول (10) قيم معامل التشوه الطولي.

الجدول (10) قيم معامل التشوه الطولي E_c بعمر 28 يوم

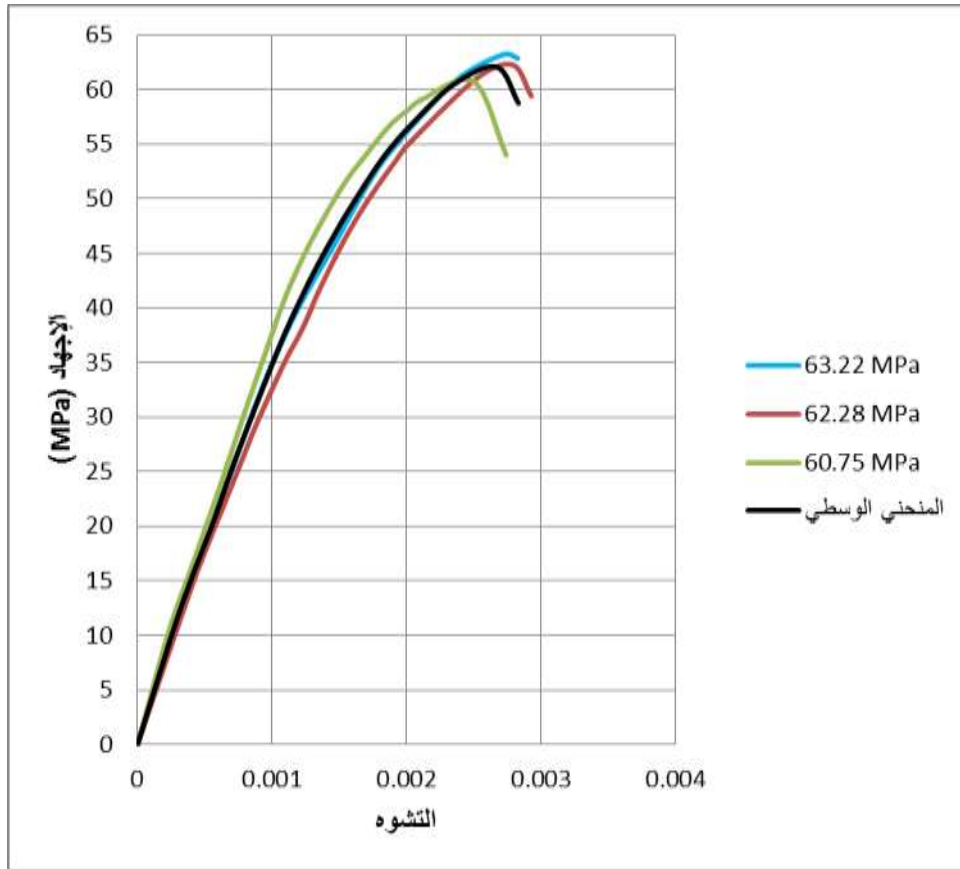
E_c التجريبي (MPa)	f'_c (MPa)	العينة
35768	63.22	1
33522	62.28	2
38316	60.75	3
35869	الوسطي	

بالمقارنة مع علاقة الكود الأمريكي للبيتون عالي المقاومة نجد أن النتائج متقاربة:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{60} = 36406 \text{ MPa}$$

(ج) نتائج منحنى إجهاد - تشوه (قانون السلوك) للعينات بعمر 28 يوم:

تم تجريب العينات تحت تأثير الضغط البسيط بسرعة ثابتة مقدارها 0.5kN/sec ، وسُجل التشوه التجريبي والإجهاد التجريبي لكل عينة حتى لحظة انهيار العينة ورسمت المخططات. ويبين الشكل (7) مخطط الإجهاد - التشوه لكل عينة وللمنحني الوسطي عند عمر 28 يوماً.



الشكل (7) مخطط الإجهاد - التشوه للعينات وللمنحني الوسطي

ثانياً مناقشة وتحليل النتائج:

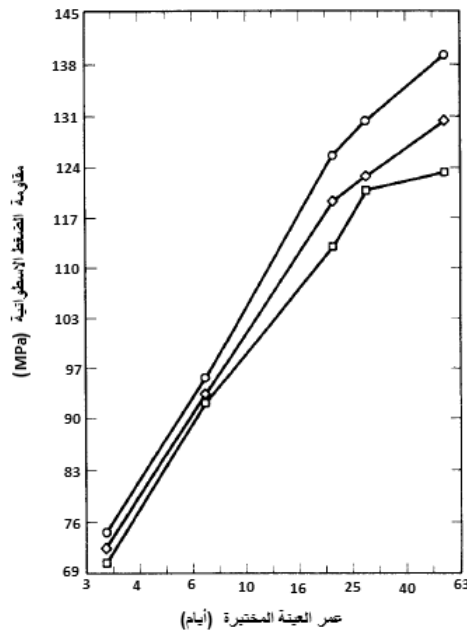
أ) مناقشة نتائج المقاومة على الضغط وتطورها مع الزمن:

تمت دراسة المقاومة لـ 3 من العينات عند عمر 7 أيام و 28 يوماً للتأكد من المقاومة للبيتون المحضّر ومدى تطور المقاومة بينهما كما هو موضح في الجدول (11).

الجدول (11) تطور المقاومة بين عمر 7 أيام و 28 يوماً

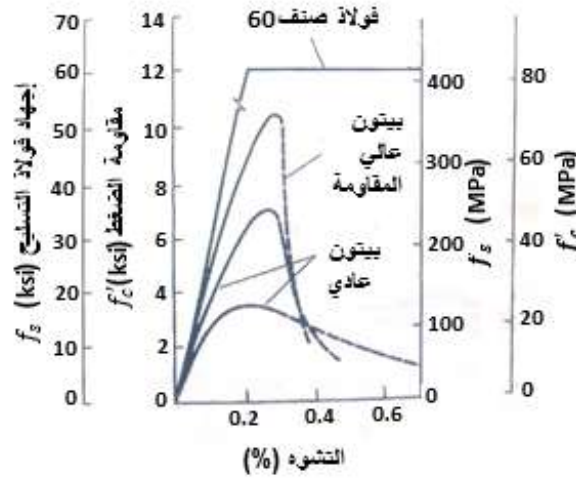
رقم العينة	المقاومة بعمر 7 أيام (MPa)	المقاومة بعمر 28 يوم (MPa)	النسبة
1	50.50	63.22	1.25
2	49.25	62.28	1.26
3	46.98	60.75	1.29

من تحليل النتائج نلاحظ أن المقاومات كانت ضمن مجال البيتون عالي المقاومة وأظهرت مقاومة العينات تطوراً في المقاومة بين 7 و 28 يوماً يتراوح بين 1.25 و 1.29 ويعود ذلك إلى أن الإماهة الإضافية محدودة بسبب نعومة الإسمنت والمواد المضافة في الخلطة، وهذا ما تؤكد بعض الابحاث مثل Nawy^[2] كما هو موضح في الشكل (8) حيث أعطت تجاربه القيمة 1.3 ، وتمثل المنحنيات الموضحة في الشكل ثلاث سلاسل من العينات استخدمها الباحث في تجاربه.

الشكل (8) تطور المقاومة مع الزمن للبيتون عالي المقاومة Nawy^[3]

ب) مناقشة نتائج منحنى الإجهاد - التشوه للبيتون عالي المقاومة:

إن تشوه البيتون عالي المقاومة يصل إلى قيمته العظمى في ذروة المخطط بتشوه أعلى بقليلاً من تلك التي في البيتون العادي انظر الشكل (9). سمح الكود الأمريكي ACI 318^[9] باعتبار قيمة التشوه الحدي تساوي 0.003 بينما الكودات الأخرى سمحت بأن تكون قيمة التشوه الحدي محصورة بين 0.0035-0.0038.

الشكل (9) مخطط الإجهادات - التشوه للبيتون والفولاذ^[4]

حددت قيم التشوه النسبي والإجهاد عند الذروة لكافة العينات وكانت قيمها كما هو موضح في الجدول (12).

الجدول (12) قيم التشوه النسبي والإجهاد عند الذروة للعينات عند عمر 28 يوم

العينات	التشوه عند الذروة	الإجهاد عند الذروة (MPa)
1	0.00272	63.22
2	0.00279	62.28
3	0.00248	60.75

بمقارنة التشوه النسبي عند الذروة في تجاربنا مع ما تعطيه بعض التجارب العالمية مثل الباحث Caijun Shi

و^[5] YL Mo - والباحث^[3] Nawy حيث كانت التشوهات عند الذروة لنتائج تجاربهم موضحة في الجدولين (13) و

(14) على الترتيب.

الجدول (13) التشوه النسبي عند الذروة حسب تجارب Caijun Shi - YL Mo^[5]

المقاومة (MPa)	41	55	69	83
التشوه النسبي عند الذروة	0.0019	0.002	0.0021	0.0023

الجدول (14) التشوه النسبي عند الذروة حسب تجارب Nawy^[3]

المقاومة (MPa)	54	68	79	97
التشوه النسبي عند الذروة	0.0023	0.0025	0.0027	0.003

نجد أن هناك تقارباً بين نتائج تجاربنا ونتائج الباحثين المبينة أعلاه وذلك بالأخذ بعين الاعتبار أن بيوتون

تجاربنا مصنع وفقاً للظروف المحلية.

-حدث انهيار العينات بشكل فجائي وأخذ شكل مخطط الإجهاد - التشوه شكل قطع مكافئ ويقترب من شكل

شبه منحرف.

- يأخذ المجال المرن لمخططات الإجهاد - التشوه (عامل التشوه الطولي) قيمة ثابتة حتى 40 % تقريباً من قيمة المقاومة وهذا ينسجم مع نتائج التجارب العالمية.

- انهارت العينات بشكل غير مطاوع وهذا السلوك غير مفضل لتصميم المنشآت بشكل عام وفي المناطق الزلزالية بشكل خاص. ولتحسين سلوك الببتون عالي المقاومة، يوصى بتصميم خلطات ببتونية عالية المقاومة مع استخدام الألياف مما يؤدي إلى جعل الانهيار أكثر مطاوعة وهو ما يتطابق مع الكودات العالمية.

تقييم قانون سلوك الببتون عالي المقاومة:

يعتمد تصميم العناصر الببتونية بشكل أساسي على مخطط الإجهاد - التشوه المبين في الشكل (10)، والنتائج عن تحميل مستمر للببتون على الضغط من الصفر وحتى القيمة عند الذروة (الإجهاد الأعظمي)، حيث تكون العلاقة خطية بين الإجهاد والتشوه حتى 30% من مقاومة الضغط الأعظمية، ومع تزايد الإجهادات حتى 50% من قيمتها القصوى تظهر شقوق صغيرة جداً على الأوجه الداخلية بين الحصى والملاط الإسمنتي تسمى شقوق التلاحم bond cracks ، ومع استمرار التحميل (50-70%) من المقاومة المميزة تزداد شقوق التلاحم وتظهر شقوق جديدة في الملاط الإسمنتي تسمى شقوق الملاط mortar cracks، مما يسبب انحناءً تدريجياً في مخطط الإجهاد - التشوه، حيث يزداد هذا الانحناء بشكل أكبر مع ازدياد الإجهادات إلى (75-90%) من قيمتها الأعظمية بسبب تزايد الشقوق في الملاط بشكل ملحوظ، وعندما يصل الإجهاد إلى $0.9f'_c$ تزداد التشققات والتشوهات اللدنة بسرعة، وتصبح الكتلة الببتونية غير مستقرة مما يؤدي إلى الانهيار [5] ، وهذا ينطبق على الببتون العادي بينما في الببتون عالي المقاومة تمر الشقوق خلال الحصى.

بملاحظة الشكل (10) ومقارنة قانون السلوك للببتون العادي والعالي المقاومة تبين أن [5]:

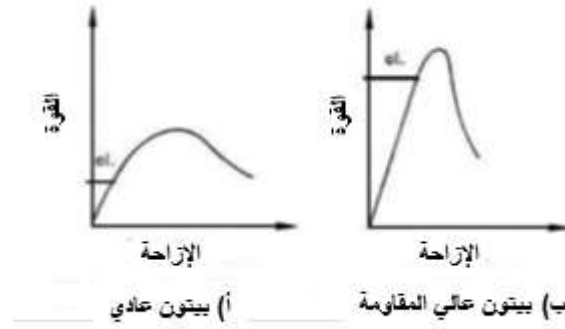
- كلما زادت مقاومة الببتون زاد التشوه عند الذروة.

- مخطط الإجهاد - التشوه يكون في الببتون العادي مرناً حتى 40 % من المقاومة ومستقيماً حتى تلك النقطة وأن هذه الاستقامة تكون أعلى في الببتون عالي المقاومة حسب مقاومة الببتون.

- يكون الانهيار تقريباً فجائياً وسريعاً مع زيادة المقاومة وهذا يدل على أن الببتون عالي المقاومة أقل مطاوعة عند الانهيار من الببتون العادي.

يؤخذ توزيع الإجهادات في منطقة الضغط حسب منحنى الإجهاد - التشوه المبني على تجارب معملية (مخبرية) قياسية. ويمكن تقريب شكل توزيع إجهادات الببتون في الضغط، باستعمال توزيع مكافئ على شكل مستطيل أو شبه منحرف أو كل شكل آخر يتوافق مع منحنى الإجهاد - التشوه المبني على التجارب المخبرية.

يختلف منحنى الإجهاد - التشوه للببتون عالي المقاومة عن منحنى الإجهاد - التشوه للببتون العادي وهذا يؤثر على خصائص الشكل المستطيل لمخطط الإجهاد المكافئ وفولاذ التسليح ومقاومة المقطع، مما يتطلب إدخال تعديلات لتحسين فاعلية الببتون عالي المقاومة.

الشكل (10) مخطط الإجهاد - التشوه للبيتون (أ) العادي (ب) عالي المقاومة^[6]

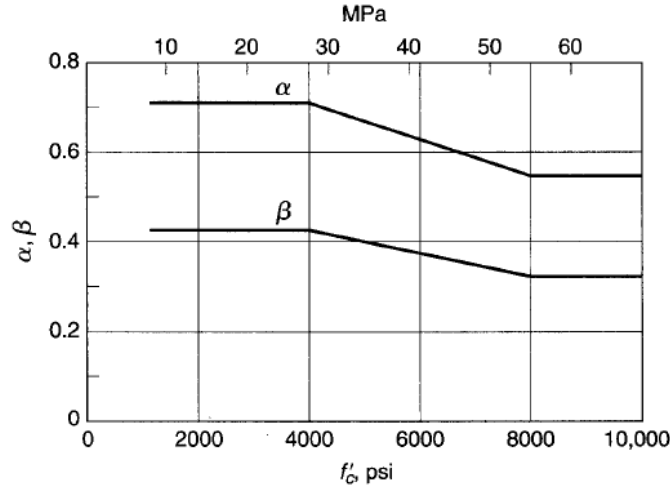
في حالة البيتون العادي يكون مخطط إجهاد الضغط على شكل قطع مكافئ ويتم استبداله بمستطيل مكافئ له وذلك لتبسيط عملية الحساب .

من أجل مقاومة بيتونية معطاء من الضروري معرفة α و β فقط لتعريف تأثير إجهاد الضغط للبيتون^[7] بشكل كامل (أنظر الشكل 11).

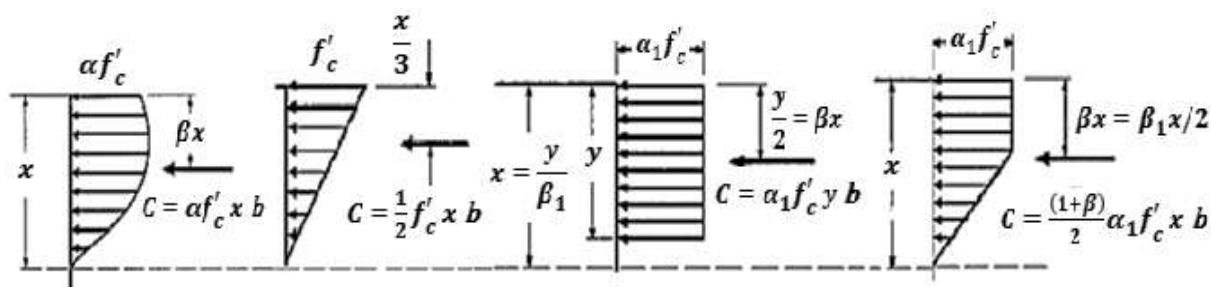
$$\alpha = \frac{f_{av}}{f'_c}$$

حيث: f_{av} متوسط إجهاد الضغط على المساحة bx (b عرض المقطع - x ارتفاع مخطط الضغط) المقاومة المميزة f'_c

β هو نسبة من المسافة x والتي تعكس موقع مركز محصلة قوة الضغط

الشكل (11) قيم α و β المتغيرة وفقاً لمقاومة البيتون f'_c ^[7]

لدراسة وتقييم مخطط منحي الإجهاد - التشوه للبيتون عالي المقاومة سنناقش الحالات الثلاث لشكل مخطط الإجهاد - التشوه للبيتون عالي المقاومة الموضحة في الشكل (12): (مستطيل - مثلث - شبه منحرف) ومقارنتهم مع منحنى الإجهاد الحقيقي (قطع مكافئ).



الشكل (12) الأشكال المكافئة (مثلث - مستطيل - شبه منحرف) لمنحني الإجهاد - التشوه ومقارنتها مع الشكل الحقيقي (قطع مكافئ) [7,3]

$$M = \alpha f'_c x b (d - \beta x) \quad \text{إن العزم المقاوم لحالة القطع المكافئ:}$$

والمقارنة بين الحالات الثلاث المدروسة مع الحالة الحقيقية (القطع المكافئ) من حيث العزم المقاوم وتحديد

البارامترات بالاعتماد على شرطي المساحة ومركز الثقل للمقطع العرضي موضحة في الجدول (15).

الجدول (15) تحديد العزم المقاوم والبارامترات للحالات الثلاث المدروسة

شبه منحرف	مثلث	مستطيل	الحالة المدروسة
$M = \frac{(1+\beta)}{2} \alpha_1 f'_c x b (d - \beta x)$	$0.5 f'_c x b (d - x/3)$	$M = \alpha_1 \beta_1 f'_c x b (d - \beta_1 x/2)$	العزم المقاوم
$\alpha x f'_c = \frac{(1+\beta)}{2} x \alpha_1 f'_c \rightarrow$ $2\alpha = (1 + \beta) \alpha_1 \rightarrow \alpha_1 = \frac{2\alpha}{1+\beta}$	$0.5 x f'_c \rightarrow \alpha = 0.5$	$\alpha x f'_c = \alpha_1 \beta_1 x f'_c \rightarrow$ $\beta_1 = \alpha / \alpha_1$	من شرط المساحة
$\beta x = \frac{\beta_1 x}{2} \rightarrow \beta_1 = 2\beta$	$\rightarrow \beta = \frac{1}{3} = 0.333$	$\beta \rightarrow \frac{\alpha}{\alpha_1} = 2\beta \rightarrow \alpha_1 = \alpha / 2\beta = \alpha / \beta_1$	من شرط مركز الثقل

وتوضح الجداول (16) و (17) قيم البارامترات لحالة المستطيل وشبه المنحرف على التوالي.

الجدول (16) قيم البارامترات المدروسة لحالة المستطيل

$f'_c (MPa)$	≤ 28	35	42	48	≥ 55
α	0.72	0.68	0.64	0.60	0.56
β	0.425	0.400	0.375	0.350	0.325
$\beta_1 = 2\beta$	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65

$\alpha_1 = \alpha/\beta_1$	0.85	0.85	0.85	0.86	0.86
-----------------------------	------	------	------	------	------

الجدول (17) قيم البارامترات المدروسة لحالة شبه المنحرف

$f'_c (MPa)$	≤ 28	35	42	48	≥ 55
α	0.72	0.68	0.64	0.60	0.56
β	0.425	0.400	0.375	0.350	0.325
$\beta_1 = 2\beta$	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65
$\alpha_1 = \frac{2\alpha}{1+\beta}$	1.01	0.97	0.93	0.89	0.85

بتقييم معادلات العزم وبارامترات إجهادات الضغط للحالات الثلاث (مستطيل - مثلث - شبه منحرف)

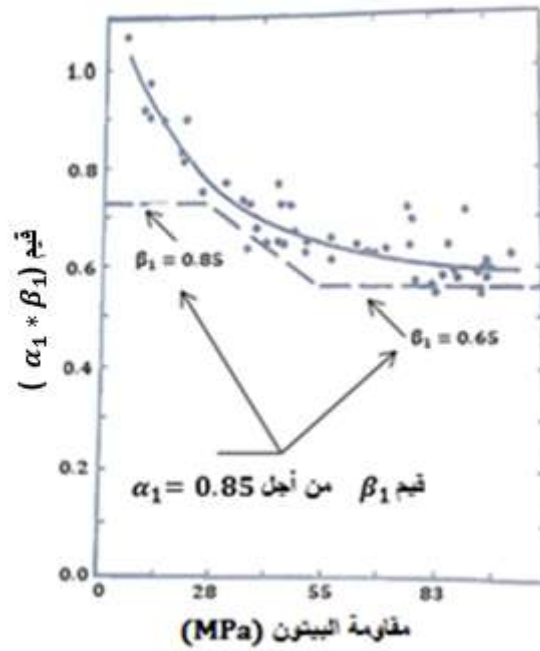
ومقارنتهم مع الحالة الحقيقية للإجهاد (قطع مكافئ) نلاحظ أن الشكل شبه المنحرف للإجهادات هو الشكل المكافئ (equivalent) لمنحني الإجهادات - التشوه للبيتون عالي المقاومة ، ونلاحظ أيضاً تناقص في قيم α و β للبيتون عالي المقاومة وهذا يعود بالحقيقة للتغير في مطاوعة الانهيار للبيتون عالي المقاومة.

إن أهم ما يميز إجهاد الضغط للشكل المستطيل قيمته في الأعلى $\alpha_1 f'_c$ حيث تأخذ قيمة $\alpha_1 = 0.85$ وارتفاع هذا المستطيل $y = \beta_1 x$ ، يعطي الكود العربي السوري المعاملين α_1 و β_1 القيمة 0.85 للمقاومات المميزة الأقل من 30 MPa إلا أنه في طبعته الأحدث 2012^[8] حدد قيمة المعامل β_1 للمقاومات الأكبر من 30 MPa بقيمة تقل عن 0.85 بمقدار 0.05 من أجل كل زيادة في المقاومة بمقدار 7 MPa أو أجزائها.

بينما أعتد الكود الأمريكي^[9] لمجمل مقاومات البيتون حتى 100 MPa قيمة ثابتة للمعامل α_1 مقدارها $\alpha_1 = 0.85$ وقيمة متغيره للمعامل β_1 بحسب المقاومة. فقد أعطى للمعامل β_1 قيمة ثابتة للمقاومات حتى 28 MPa مقدارها $\beta_1 = 0.85$ كما هو موضح في الشكل (13) وتأخذ β_1 قيمة مختلفة بين (28-55MPa) . وتعطى للمقاومات الأكبر من 55 MPa قيمة ثابتة مقدارها $\beta_1 = 0.65$ ، وهذا المجال هو مجال للبيتون عالي المقاومة. وبالتالي فإن المعامل β_1 حسب الكود الأمريكي يساوي $\beta_1 = 0.85$ ويخفّض بنسبة 0.05 لكل 7 MPa في

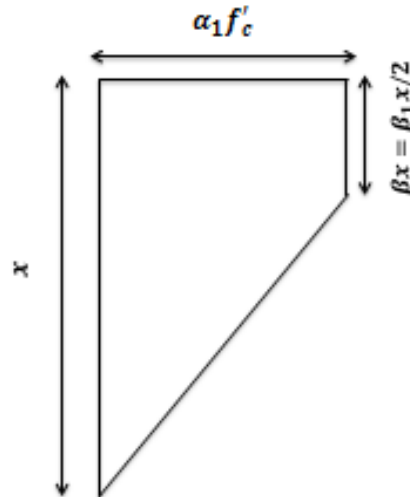
حال زيادة المقاومة عن 28 MPa أي:

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{for } 17MPa < f'_c \leq 28 MPa \\ 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7} & \text{for } 28MPa < f'_c \leq 55 MPa \\ 0.65 & \text{for } f'_c > 55 MPa \end{cases}$$



الشكل (13) قيم المعاملات α_1 و β_1 لمقاومات مختلفة حتى 100 MPa حسب ACI [9]

بنتيجة تقييم مخطط الإجهاد - التشوه للعينات المختبرة نجد أن مخطط الإجهاد - التشوه يأخذ شكل شبه منحرف (بمقاومة $f'_c = 60 \text{ MPa}$) قيمته في الأعلى $\alpha_1 f'_c$ وارتفاع مخطط الضغط x . وبهذا الشكل يمكننا الاستنتاج أن المعامل α_1 يأخذ القيمة $\alpha_1 = 0.85$ والمعامل β_1 يأخذ القيمة $\beta_1 = 0.65$ كما في الشكل (14).

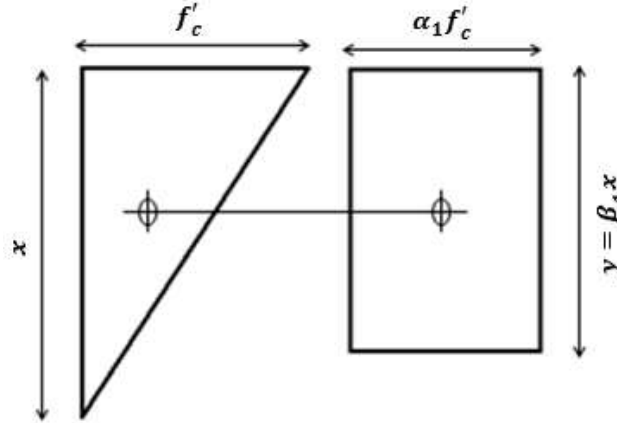


الشكل (14) شكل مخطط الضغط شبه المنحرف المكافئ المقترح للبيتون عالي المقاومة ($f'_c = 60 \text{ MPa}$) [3]

في حال زيادة المقاومة للبيتون عن ($f'_c \geq 80 \text{ MPa}$) فإن شكل مخطط الإجهاد - التشوه يكون أقرب للشكل المثلثي منه للشكل شبه المنحرف، وفي هذه الحالة نجد أن مخطط الإجهاد - التشوه يأخذ شكلاً مثلثياً قيمته في أعلى المثلث f'_c وارتفاع مخطط الضغط x .

ومن أجل الاستفادة من القوانين الموضوعية لمخطط إجهاد مستطيل نستطيع أن نحول مخطط الضغط المثلثي إلى مستطيل قيمته العظمى في الأعلى $\alpha_1 f'_c$ وارتفاعه $\beta_1 x$ ، ومن أجل تماثل الكودات العالمية يتم تحويل مخطط

الإجهادات المثلي إلى مخطط الإجهادات المستطيل بحيث يكون لهما حجم مخطط الإجهادات نفسه أي نفس القوة الضاغطة ونفس مركز الثقل أي نفس العزم، وبهذا الشكل يمكننا الاستنتاج أن المعامل α_1 يأخذ القيمة $\alpha_1 = 0.75$ والمعامل β_1 يأخذ القيمة $\beta_1 = 0.65$ كما في الشكل (15).



الشكل (15) شكل مخطط الضغط المستطيل المكافئ المقترح للبيتون عالي المقاومة ($f'_c \geq 80 \text{ MPa}$)^[7]

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

-فيما يخص تطور المقاومة مع الزمن يمكن اعتماد قيمة معامل التصحيح لنتائج اختبارات الضغط للبيتون عالي المقاومة المصنع من اسمنت بورتلاندي عادي عند عمر 7 أيام القيمة (1.27) وهي قيمة قريبة من القيم الواردة في الابحاث العالمية (1.3).

-يمكن اعتماد قيم التشوه عند الذروة لتجارينا للبيتون عالي المقاومة المصنع في الظروف المحلية. يمكن اعتماد قيمة التشوه الحدي بين 0.0035-0.0038 للبيتون عالي المقاومة المصنع في الظروف المحلية.

-حدث انهيار عينات البيتون عالي المقاومة المصنع في الظروف المحلية بشكل فجائي وبشكل غير مطوع وهذا السلوك غير مفضل لتصميم المنشآت بشكل عام وفي المناطق الزلزالية بشكل خاص.

-إن مخطط الإجهاد- التشوه يأخذ شكل شبه منحرف للبيتون عالي المقاومة (بمقاومة $f'_c = 60 \text{ MPa}$) قيمته في الأعلى $\alpha_1 f'_c$ وارتفاع مخطط الضغط x ، وبالتالي يمكن اعتماده للحساب و تأخذ المعاملات القيم $\alpha_1 = 0.85$ و $\beta_1 = 0.65$ أنظر الشكل (14).

-في حال زيادة المقاومة للبيتون عن ($f'_c \geq 80 \text{ MPa}$) فإن شكل منحنى الإجهاد- التشوه يكون أقرب للشكل المثلي منه للشكل شبه المنحرف، وفي هذه الحالة نجد أن مخطط الإجهاد- التشوه يأخذ شكلاً مثلياً قيمته في أعلى المثلث f'_c وارتفاع مخطط الضغط x ، وبالتالي يمكن استنتاج معاملات إجهادات المستطيل المكافئ واعتمادها للحساب والتي تأخذ القيم $\alpha_1 = 0.75$ و $\beta_1 = 0.65$ أنظر الشكل (15).

التوصيات:

- إجراء تجارب موسعه للبيتون عالي المقاومة المصنع في الظروف المحلية وخاصة لكل من تطور المقاومة مع الزمن ومعامل التشوه الطولي والعرضي.
- يوصى بإجراء تجارب ودراسات أخرى لجعل سلوك البيتون أكثر مطاوعة كاستخدام الألياف مع البيتون عالي المقاومة، تطويق البيتون أو غيرها .
- إجراء تجارب خاصة للبيتون عالي المقاومة المصنع في الظروف المحلية ودراسة تأثير الحرارة على هذا البيتون.

المراجع:

- [1] *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM, C469-2002.
- [2] NAWY, E. G. *Prestressed Concrete Fundamental Approach*. 4th Edition, Prentice Hall USA ,2003,938.
- [3] NAWY, E. G. *Fundamentals of High Performance Concrete*. Second Edition , John Wiley@ Sons, Inc-USA , 2001,441.
- [4]*State of the Art on High Strength Concrete*. ACI Report 363R-92, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich,1992.
- [5] CAIJUN Shi and YL MO. *High- Performance Concrete Materials- Science and Application*. Engineering Materials for Technological Needs- Vo1.1, World Scientific Publishing, 2005, 431.
- [6] REINHARDT, H. W. *Structural Behaviour of High Performance Concrete*. Otto-Graf-Journal, Vol. 11, 2000 , 9-18.
- [7] NILSON, A. H. ; DARWIN, D.; DOLAN, C. W. *Design of Concrete Structures*. Fourteenth Edition, The McGraw- Hill Companies, Inc-1221 Avenue of the Americas, New York, 2010,795.
- [8] الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة، دمشق، الطبعة الرابعة، 2012
- [9] *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08)and commentary*. ACI Committee 318, American Concrete Institute,2008,318-465.
- [10] *Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash (ACI 211.4R-93)*. ACI Committee 211, reapproved 1998.
- [11] هيئة المواصفات والمقاييس العربية السورية (م . ق . س 644)، سوريا، 1988.