

دراسة أثر إضافة الألياف الفولاذية في الخواص الميكانيكية وطاقة التصدع للبيتون

د. مياد الأحمد الكوسا*

الملخص

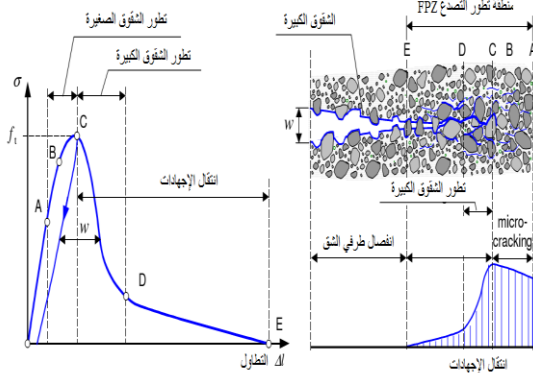
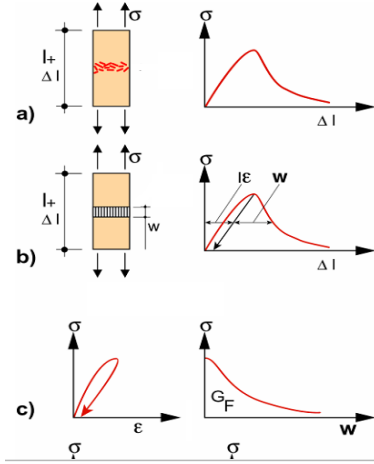
يعدُّ البيتون من المواد الهشة ذات المقاومة المنخفضة على الشد، ويمكن بإضافة الألياف إلى الخلطة البيتونية زيادة مقاومته على الشد والحد من انتشار الشقوق إذ إنّ الألياف تؤخر تشكل الشقوق، كما تزيد من طاقة مقاومته للتصدع. في هذه الدراسة أُضيفت ألياف فولاذية إلى الخلطة البيتونية بنسبتين حجميتين مختلفتين وبطولين مختلفين، واختُبرت الخلطات على الشد والضغط، كما أُجريت تجربة الانعطاف ثلاثية النقاط على جانز مزود بثلم (شق مبدئي). بأبعاد $750*150*80 \text{ mm}^3$ للحصول على طاقة التصدع G_F ومعامل مقاومة انتشار الشقوق K_{ic} . أظهرت نتائج الدراسة أنّ إضافة الألياف تؤدي إلى تحسن بسيط في مقاومة الضغط تصل حتى % (4.5) فقط ولكنها تحسن مقاومة الشد بشكل ملحوظ يصل حتى % 50، وتزيد من مطاوعة البيتون، كما أنّ بارمترات طاقة التصدع K_{ic} ، G_F تزداد بازدياد المحتوى الحجمي من الألياف، وكذلك بزيادة طول الألياف المضافة، وتجعل البيتون بحاجة إلى طاقة تصدع أكبر لتشكيل الشقوق كما أنها تحد من انتشار الشقوق

الكلمات المفتاحية: خواص البيتون المدعم بألياف فولاذية— طاقة التصدع – الألياف الفولاذية.

* أستاذ مساعد قسم الهندسة الإنشائية- كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق

1- المقدمة:

الشق " $\sigma-w$ "، إذ تكون المساحة أسفل هذا المنحنى هي مقياس اعتباري لطاقة التصدع شكل (1).



الشكل (1) تجربة الشد البسيط

Uniaxial tension test [2] Roesler 2007

وهي تعبر عن مقاومة المادة لظهور التشققات فيها. وتعدّ إحدى خصائص البيتون التي تصف كمية الطاقة اللازمة لتشكيل شق مساحته هي واحدة المساحة. تحدث التشققات شكل (2) في منطقة تسمى منطقة تطور التصدعات "FPZ" *Fracture Process Zone*، ويمكن وصف سلوك البيتون فيها باستخدام نموذج الشق الوهمي الذي وضعه الباحث. Hillerborg [3].

تنتج الشقوق في المنشآت البيتونية من حالات التحميل المختلفة ومن انكماش البيتون، وكذلك بسبب الظروف البيئية المحيطة كتناوب تجمد- ذوبان. إن وجود هذه الشقوق وامتدادها يؤثر سلباً في ديمومة المنشآت الهندسية، لذا كان لا بدّ من دراسة استقرار هذه الشقوق ومحاولة الحد من انتشارها ومعرفة مدى مقاومة البيتون لظهور هذه التشققات، يعبر عن مقاومة المادة لظهور التشققات فيها باستخدام طاقة التصدع G_F وتعدّ طاقة التصدع خاصية مادية ضرورية لتصميم المنشآت الهندسية ولمعرفة سلوكها في مرحلة الاستثمار.

سُجّلت حالات انهيار لأبنية قبل استخدام نظريات ميكانيك التصدع في تصميم المنشآت الهندسية التي لم تكن لتتهار لو صممت اعتماداً على مبادئ ميكانيك التصدع *Mechanics Fracture*، ومن هذه الأبنية جسر التصدع [Bazaant] Hanshim في كوبا الذي انهيار نتيجة زلزال عام 1995، وانهيار منصة *Steipner* عام 1991 في النروج، وانهيار سد *Malpasset* القوسي في فرنسا عام 1959 إذ كان فيه لتأثير الحجم دوراً رئيساً في تخفيض المقاومة الاسمية عن القيمة التجريبية التي فسرها ميكانيك التصدع فيما بعد [1] *Bazant & Giraudon 2002*. ونظراً إلى أنّ البيتون من المواد الهشة ذات المقاومة المنخفضة على الشد فإن إضافة الألياف الفولاذية إلى الخلطة البيتونية تزيد مقاومته على الشد وترفع من طاقة مقاومته على التصدع، كما أنّها تحد من انتشار هذه الشقوق.

2- طاقة التصدع $Fracture Energy$:

يكون سلوك البيتون على الشد خطياً قبل وصول الإجهاد إلى مقاومة المادة على الشد، أمّا بعد ذلك فيكون لدينا زيادة في اتساع الشق تترافق مع انخفاض للإجهاد، وهذا ما يدعى بسلوك التلين ويعبر عنه بمنحنى "إجهاد-اتساع

نتائج البحث إلى أن إضافة الألياف إلى البيتون تحسن المطاوعة وتزيد التشوه عند إجهاد الذروة، كما درس الباحثون [8] Mohamed , M.G. Wardeh, and E.Ghorbel أثر إضافة ألياف نباتية (ألياف الأرز) وإضافة خليط من الألياف الفولاذية والنباتية إلى خلطة بيتون ذاتي الارتصاص، تشير نتائج البحوث إلى أثر الألياف في الحد من اتساع الشقوق، وانتشارها، وقد أصبح البيتون بحاجة لطاقة تصدع أكبر لتشكل الشقوق . كما درس الباحثون (Qian, C.andP. Stroeven [9]) أثر إضافة مزيج من الياف فولاذية وألياف من البولي بروبيلين إلى الخلطة البيتونية، وأشارت النتائج إلى زيادة في طاقة مقاومته على التصدع.

3- هدف البحث:

هَدَفَ البحث إلى دراسة أثر إضافة الألياف الفولاذية من حيث النسبة الحجمية وطول الألياف المضافة في المواصفات الميكانيكية وطاقة التصدع G_F للبيتون.

4- الدراسة التجريبية:

أُجْرِيَتِ الدراسة التجريبية في مخابر جامعة دمشق ومخابر جامعة البعث.

4-1 الخلطات البيتونية:

صُمِّمَتِ الخلطة وفقاً لمعايير [ACI . 2003]. CI 446.1R.91

4-1-1 المواد المستخدمة:

- استخدام الاسمنت البورتلاندي العادي في الخلطات،

معمل السبع - لبنان . ماركة M 42.5

- الحصىيات من مقلع الحفير الشمالي- ريف دمشق،

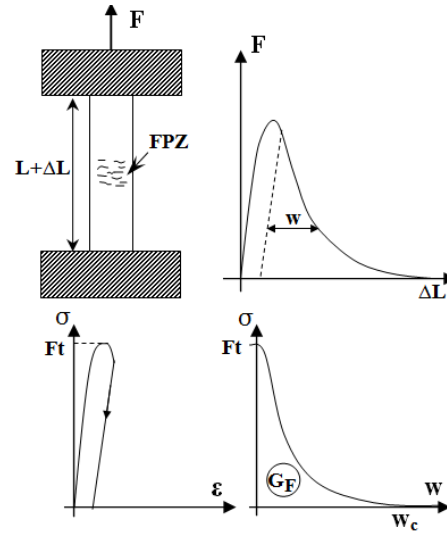
مكون من خليط فولفي وعدسي $D_{max} : 20 \text{ mm}$

- استُعمِلَت ألياف فولاذية مبينة بالشكل (3) بطولين: *

ألياف فولاذية من النوع (L)، وهي ألياف طويلة بطول 32

mm * ألياف فولاذية من النوع (S)، وهي ألياف قصيرة

بطول 24 mm .



الشكل (2) منطقة تطور التصدعات

كما وضعت RILEM (الاتحاد العالمي لمخابر وخبراء مواد البناء)

(Reunion international des laboratoires et Experts des Matériaux)

طريقة لحساب طاقة التصدع G_F اعتماداً على تجربة الانعطاف ثلاثية النقاط

TPT (Three Points Test) على جائز مزود بتلم، إذ يُسَجَّل

كلٌّ من منحنى "حمولة - انتقال"، ومنحنى "حمولة -

اتساع الشق" تحسب G_F من المساحة تحت منحنى

"حمولة- انتقال" مقسومة على مساحة المقطع الصافي من

دون التلم [4] RILEM

توصل الباحثون :

([5] Swamy , [6] Fanella D.A)

إلى أن مقاومة الشد ومقاومة الانعطاف تزداد بزيادة النسبة

المئوية لمحتوى الألياف في الخلطة البيتونية، إلا أن

الألياف تؤدي إلى تحسن بسيط في مقاومة الضغط لا

يتجاوز 15%، ولكنها تزيد المطاوعة إلى نحو 25% إذ

تزداد قيمة التشوه الموافق لإجهاد الذروة. درس R.D Neves

[7] تأثير مقاومة الخلطة ومحتوى الألياف وقطر الألياف

في سلوك الضغط للبيتون المسلح بألياف فولاذية، أشارت

تعتمد في عملها على التلاحم بينها وبين المونة الإسمنتية.

- مصنوعة من سبائك فولاذية، *grade St52* مطابق لـ *DIN17100*.

- الوزن الحجمي للألياف يساوي 2174 Kg/m^3

- قوة الشد تراوح بين $800-2400 \text{ MPa}$

- عامل المرونة $E=200 \text{ GPa}$.

- يوضح (الجدول 1) خواص نوعي الألياف المستخدمة.



الشكل (3) الألياف الفولاذية المستخدمة بالدراسة

وبحسب شركة الصنع فإن مواصفات الألياف الفولاذية المستخدمة هي كالآتي:

- المقطع العرضي مثلثي. النهايات معكوفة، التواء على طول الليف لتحسين فعاليتها في التقوية، إذ إنّها

الجدول (1) خواص الألياف الفولاذية.

Fiber	L	S
الإجهاد الأعظمي σ_u (MPa)	>2300	>1150
الطول l (mm)	32	24
القطر d (mm)	0.38	0.38
عامل الشكل l/d	84	63

4-1-2 الخلطة A ذات مقاومة مميزة على الضغط $f_c = 25 \text{ MPa}$ واسمنت عيار 350 Kg/m^3 ,

C : S : G : W

1 : 2.3 : 2.8 : 0.57

إعتمد متغيران أساسيان لخلطة البيتون المسلح بألياف فولاذية وهما المحتوى الوزني للألياف وطولها:

1-المحتوى الوزني للألياف الفولاذية % W_f

استخدمت الألياف الفولاذية بمحتويين وزنيين هما:

المحتوى الوزني الأول: وزن الألياف 25 Kg/m^3 (النسبة الوزنية 1.1%) وهو أقل وزن يمكن إضافته إلى الخلطة البيتونية

بحسب شركة الصنع، أي إنّ إضافة ألياف فولاذية إلى الخلطة البيتونية بوزن أقل من ذلك هو غير مجدٍ. ومن ثمّ يكون

المحتوى الحجمي $V_f=1.15\%$

المحتوى الوزني الثاني: وزن الألياف 30 Kg/m^3

(النسبة الوزنية 1.28%) ومن ثمّ يكون المحتوى الحجمي

$V_f=1.38\%$

2- استخدمت الألياف الفولاذية بطولين مختلفين: (L) و (S)

الجدول (2) نسب المواد المستخدمة في الخلطات البيتونية:

الخلطة البيتونية	C Kg/m ³	Agg Kg/m ³	W Kg/m ³	Dmax mm	S Kg/m ³	وزن الألياف الفولاذية	
						(L) Kg/m ³	(S) Kg/m ³
A خلطة مرجعية	350	980	199.5	20	805	-	-
AIL						25	-
A2L						30	-
A1S						-	25
A2S						-	30

بالفلق من كل خلطة بيتونية، وحُسِبَت المقاومة على الشد
بالفلق من العلاقة:

$$f_t = 0.9 \cdot (2 \cdot \frac{F}{A \cdot L}) \cdot (ACI2003)$$

كُسِرَت ثلاث عينات مكعبية $150 \times 150 \times 150$ على
الضغط، وثلاث عينات أسطوانية $150 \text{ mm} \times 300$ على الشد

الجدول (3) المقاومات الوسطية للخلطات الناتجة من اختبار العينات المذكورة اعلاه

الخلطة البيتونية	مقاومة الضغط MPa		مقاومة الشد MPa
	7 days	28 days	
A خلطة مرجعية	21.5	28.0	2.5
AIL	24.0	29.5	3.7
A2L	22.5	28.8	3.6
A1S	24.3	29.8	3.8
A2S	22.7	29.0	3.7

الربط بازدياد عدد الألياف وإرسائها في البيتون، أي تقوم
الألياف بالحد من الشقوق الداخلية ومنع انتشارها، وهذا
يفسر الزيادة في مقاومة الشد.
صُبَّت ثلاثة جوائز من كل خلطة بأبعاد $750 \times 150 \times 80$
[mm]، كما هو مبين في الجدول (4) a_0 ارتفاع التلم، D
ارتفاع الجائز.

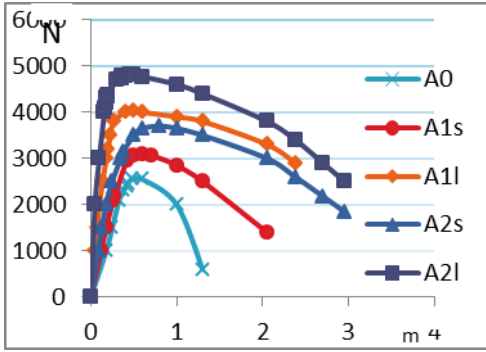
يتضح من الجدول السابق تحسن بسيط في مقاومة الضغط
(28 يوماً) 4.5% وسطياً، لكن التحسن يكون واضحاً في
السلوك اللدن في أثناء الانكسار بسبب الزيادة في معدل
التماسك و المتانة وغياب ظاهرة الانكسار الهش للبيتون
في حالة الضغط، في حين بلغت الزيادة في مقاومة الشد
حتى 50% إذ ينتقل جزء من قوة الشد عبر الشق بواسطة
الألياف التي تؤمن ربط طرفي الشق، وتزداد فعالية هذا

الجدول (4) أبعاد الجوائز المدروسة كما هو مبين في الشكل (6) ومواصفات المادة

الخلطة البيتونية	الجائز	H [mm]	B [mm]	S mm	a_0/D	كتلة الجائز [kg]	f^c	f_t
A	B1	150	80	600	0.33	15.85	28.0	2.5
AIL	B2					15.25	29.5	3.7
A2L	B3					15.90	28.8	3.6
A1S	B4					16.25	29.8	3.8
A2S	B5					16.71	29.0	3.7

أجهزة الاختبار على الانعطاف بسرعة تحميل محددة، أي
أن الحمولة تتزايد خطياً. إذ يُعاد التحميل بعد الوصول إلى

إستخدِمَ جهاز الاختبار DIGIMAX شكل (4) في مخابر
جامعة البعث الذي يتميز بحساسية لا تتوافر في بقية



الشكل (6) منحنيات حمولة-N-انتقال

5-2 منحنيات حمولة - انتقال:

يمكن الحصول على هذه المنحنيات شكل (6) من تجربة الانعطاف ثلاثية النقاط على جانز مزود بثلم (شق مبدئي). تستخدم منحنيات حمولة انتقال لحساب طاقة التصدع وفق *RILEM* نلاحظ أن قيمة القوة الأعظمية، وكذلك الانتقال الأعظمي تزداد بازدياد محتوى الألياف، من قراءة المنحنيات في الشكلين، ونرى أن تناقص تقعر الذروة يدل على زيادة في المطاوعة، كذلك تناقص ميل الجزء الهابط من المنحنيات يدل على زيادة اللدونة ما بعد الذروة، مما يؤكد أثر الألياف في تحسن سلوك البيتون ما بعد الذروة، وابتعاده عن الانهيار الهش. إذ تعمل الألياف على ربط التشققات؛ مما يؤدي إلى زيادة المقاومة إلى أن تنقطع أو تنسحب هذه الألياف من البيتون.

6- حساب طاقة التصدع وفق *RILEM*:

تعطى علاقة طاقة التصدع وفق *RILEM* من المساحة تحت منحنى "حمولة - انتقال" مقسوماً على مساحة المقطع دون الثلم. يمكن الحصول على منحنى "حمولة - انتقال" من تجارب الانعطاف البسيط على جوائز مجهزة بشق، كما هو مبين في الشكل (7).

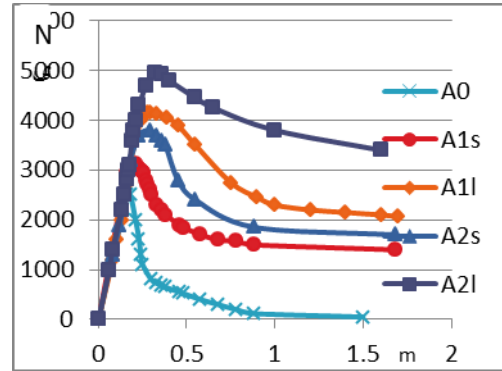
الحمولة الأعظمية ويستمر بقياس الحمولة والتشوهات، يوفر الجهاز إمكانية التحميل البطيء، ويمكن وصله بجهاز قياس التشوهات *DATA LOGGER* الذي يمكن بواسطته التسجيل الدوري لمعطيات "حمولة - اتساع شق" فضلاً عن الانتقال حتى الانهيار. والموضح بالشكل رقم 4 ادناه.



الشكل (4) جهاز الاختبار DIGIMAX5

-المنحنيات التجريبية لجوائز البحث الناتجة من تجربة الانعطاف:

1-5منحنيات "حمولة- اتساع الشق": يمكن الحصول على هذه المنحنيات شكل (5) من تجربة الانعطاف ثلاثية النقاط على جانز مزود بثلم (شق مبدئي). منحنى "حمولة- اتساع شق"



الشكل (5) منحنيات حمولة -N- اتساع الشق mm

نلاحظ أن فتح الشق الأعظمي والقوة الموافقة للشق الأعظمي يزداد بازدياد محتوى الألياف، وكذلك باستخدام الألياف الطويلة.

δ_0 : الانتقال الشاقولي الأعظمي.

A_{lig} : مساحة المقطع العرضي دون عدّ الشق

$$A_{lig} = b(d - a)$$

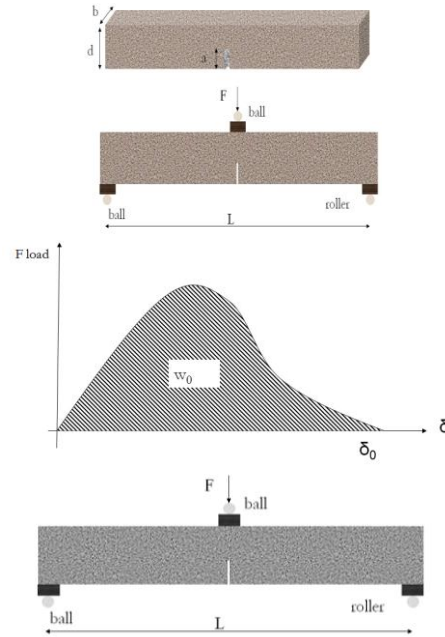
باستخدام منحنيات "حمولة - انحراف" التجريبية حُسِبَتْ طاقة التصدع وفق *RILEM* من العلاقة (1) وذلك من أجل الجوائز المدروسة جميعها، وكانت النتيجة كما هو موضّح في الجدول (5).

7- حساب مقاومة امتداد الشقوق في البيتون: وضع الباحث [10] *Rienhardt* معادلة لحساب مقاومة امتداد الشقوق اعتماداً على طول الشق؛ بشرط أن يكون المجاز أربعة أضعاف ارتفاع الجائز ($S/D=4$) وتعطى هذه المعادلة بالعلاقة الآتية:

$$(2) K(P,a) = \frac{3PS\sqrt{a}}{2D^2B} F_3 \left(\frac{a}{D} \right)$$

$$F_3 \left(\frac{a}{D} \right) = \frac{1.99 - a/D(1 - \frac{a}{D}) [2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{D} \right) + 2.7 \left(\frac{a}{D} \right)^2]}{\left(1 + \frac{2a}{D} \right) \left(1 - \frac{a}{D} \right)^{3/2}}$$

إذ: $p(N)$ الحمولة الأعظمية، D (mm) ارتفاع الجائز، a طول الشق (mm)، s (mm) مجاز الجائز، B (mm) عرض الجائز.



الشكل (7) تجربة الانعطاف ثلاثية النقاط على جائز مزود بثلم

تعطى طاقة الانهيار G_F بالعلاقة الآتية [2]

$$(1) G_{F(RILEM)} = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A_{lig}} [N/m]$$

إذ:

W_0 : المساحة تحت منحنى القوة كتابع للانتقال، كما هو مبين في الشكل (4).

m : كتلة الجائز مضافاً إليه كتلة المعدات المستخدمة لإجراء الاختبار.

g : تسارع الجاذبية الأرضية .

الجدول (5) القيم الوسطية لطاقة التصدع المحسوبة وفق *RILEM* وقيم مقاومة امتداد الشقوق K_{ic}

الخلطة البيتونية	الجائز	W_0 mm^2	m kg	δ_0 mm	$G_{F(Rilem)}$ N/mm	K_{ic} $MPa \cdot mm^{0.5}$	نسبة الزيادة لطاقة التصدع
الخلطة المرجعية A	B1	897.5	15.76	1.265	0.197	21	
A1L	B2	2512.5	15.425	2.055	0.65	25.2	%230
A2L	B3	2871.5	16	2.7	0.71	26.25	%260
A1S	B4	2782.25	16.11	2.38	0.69	27.09	%250
A2S	B5	3051.5	16.71	2.95	0.729	27.72	%270

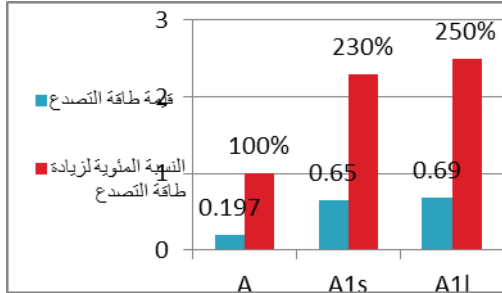
من الجدول المبين أعلاه نلاحظ أنّ النسبة الحجمية

للألياف المضافة لها أثر واضح في زيادة قيمة طاقة التصدع ومقاومة انتشار الشقوق K_{ic} ، في حالة الألياف القصيرة عند (المحتوى الحجمي

$V_f = 1.15\%$ ازدادت طاقة التصدع % 230 وازداد

K_{ic} بقيمة % 20

250 شكل (11)، أمّا في حالة الألياف القصيرة عند (المحتوى الحجمي $V_f = 1.38\%$) فازدادت طاقة التصدع 260%، وفي حالة الألياف الطويلة (المحتوى الحجمي $V_f = 1.38\%$) 270% شكل (10).



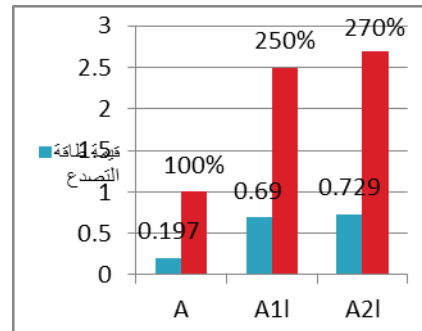
الشكل (11) أثر طول الألياف

(المحتوى الحجمي $V_f = 1.15\%$) في طاقة التصدع

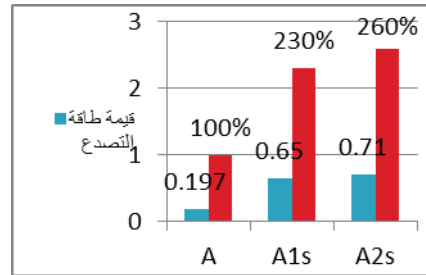
نتائج الدراسة:

- 1- ان إضافة الألياف يحسن سلوك البيتون لمقاومة الشد إذ تزداد إجهادات تحمل الشد وكذلك قيمة اتساع الشق الأعظمي بازدياد المحتوى الوزني أو الحجمي من الألياف.
- 2- تزداد إجهادات تحمل الشد بإضافة الألياف الطويلة أكثر من الألياف القصيرة إذ يؤدي ازدياد طول الليف إلى زيادة إرساء الليف في مادة الترابط، ومن ثمّ تزداد المقاومة حتى يُسحب هذا الليف أو يُنقطع.
- 3- ان إضافة الألياف تزيد من طاقة التصدع نحو 250%.
- 4- تزداد طاقة التصدع بازدياد المحتوى الوزني والحجمي للألياف .
- 5- طاقة التصدع الناتجة بإضافة الألياف الطويلة أكبر منها للألياف القصيرة.

ألياف قصيرة عند (المحتوى الحجمي $V_f = 1.38\%$) ازدادت طاقة التصدع 260% وازداد K_{ic} بقيمة 25 % الشكل (9)، أمّا في حالة الألياف الطويلة عند (المحتوى الحجمي $V_f = 1.15\%$) فازدادت طاقة التصدع 250% وازداد K_{ic} بقيمة 29%، أمّا في حالة الألياف الطويلة (المحتوى الحجمي $V_f = 1.38\%$) 270 % الشكل (8) فازداد K_{ic} بقيمة 32%.

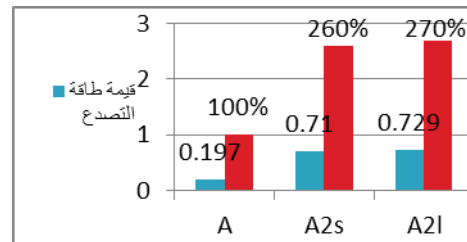


الشكل (8) تأثير المحتوى الحجمي في حالة الألياف الطويلة في طاقة التصدع



الشكل (9) تأثير المحتوى الحجمي في حالة الألياف القصيرة في طاقة التصدع

كما نلاحظ أنّ ل طول الألياف أثر في طاقة التصدع، ففي حالة الألياف القصيرة عند (المحتوى الحجمي $V_f = 1.15\%$) ازدادت 230% وفي حالة الألياف الطويلة عند (المحتوى الحجمي $V_f = 1.15\%$) ازدادت %



الشكل (10) اثر طول الألياف

(المحتوى الحجمي $V_f = 1.38\%$) في طاقة التصدع

المراجع العلمية*

- 1-Bazant,ecq-Giraudon, 2002- Statistical prediction of fracture parameters of concrete Z.P. and E. B and implications for choice of testing standard. cement and Concrete Research-
- 2] Roesler, J., et al., Concrete fracture prediction using bilinear softening. Cement and Concrete Composites, 2007
- [3] Hillerborg, A., M. Mod er, and P.-E. Petersson, 1976 -Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research,, 6(6): p. 773-781.
- [4] RILEM 50-FMCDraft Recommendation, 1985- Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. Materialsand Structures/Matériaux et Constructions,, 18(4): p. 287-290.
- [5] Swamy ,R.N and Mangat,P.S.1989-influence of fiber –aggreate interactive on some properties of steel fiber reinforced concrete ...Materiaux et construction vol.7.No.41,pp.307-314.
- [6]-Fanella, D.A and Naaman,A.E.1985-stress-strain properties of fiber reinforced mortar compression ACI journal / july –august 1985 , title no.82-41,pp.457-483
- [7]-R.D Neves and J.C.O Fernandes de Almeida , (2005)." **Compressive behaviour of steel fibre reinforce**" , Structural Concrete. 2005 . 6 . No 1
- [8] Mohamed, M., G. Wardeh, and E. Ghorbel. Effect of adding micro-vegetable fiber in the mix design and resistance of self compacting concrete. in 2nd Int. Symposium on Design, Performance and Use of Self Consolidating Concrete. 2009.
- [9] Qian, C. and P. Stroeven, Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres. Cement & Concrete Composites, 2000.
- [10] Hans W.Reinhardt , ShilangXu. "Crack resistance based on the cohesive force in concrete". Engineering Fracture Mechanics 64 (1999) 563-587.