

مساهمة في دراسة تأثير الألياف الفولاذية على سلوك البيتون عالي المقاومة

الدكتور علي تريكية *

الدكتور نزيه منصور **

علي نوح ***

(تاريخ الإيداع 1 / 11 / 2015. قُبِلَ للنشر في 10 / 1 / 2016)

□ ملخص □

يتضمن البحث دراسة تجريبية لتأثير الألياف الفولاذية على المتغيرات الأساسية لمخطط الإجهاد- تشوه للبيتون عالي المقاومة على الضغط البسيط، أي على: شكل مخطط الإجهاد- تشوه، معامل مطاوعة البيتون، قدرة المادة على امتصاص الطاقة.

لهذه الغاية تم تحضير مجموعة من العينات البيتونية الاسطوانية بمقاومة على الضغط (70 MPa). تمت إضافة الألياف الفولاذية ذات نسبة الشكل $L/D=70$ بأربع نسب حجمية مختلفة للخلطة البيتونية وهي: (0-1-1.5-2)%. اختبرت الاسطوانات تحت تأثير التحميل المستمر على الضغط وتم الحصول من خلال نتائج الاختبارات على المنحني الكامل لمخطط الإجهاد- تشوه.

أظهرت النتائج التجريبية للبحث وجود تأثير إيجابي ملحوظ للألياف الفولاذية على سلوك البيتون عالي المقاومة ويزداد هذا التأثير كلما زادت كمية الألياف الفولاذية في الخلطة. يظهر ذلك في مخطط الإجهاد- تشوه، حيث أن الجزء الصاعد يتغير بشكل طفيف، بينما الجزء الهابط يتغير بشكل كلي ويقل انحداره بزيادة كمية الألياف الفولاذية، وبالتالي تحسين مطاوعة البيتون عالي المقاومة وقدرته على امتصاص الطاقة، وبذلك يتعد سلوك البيتون عالي المقاومة عن السلوك الهش.

الكلمات المفتاحية: بيتون عالي المقاومة، ألياف فولاذية، سلوك البيتون، المطاوعة، امتصاص الطاقة.

* أستاذ مساعد - 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.

Contribution to study the influence of steel fiber on the high strength concrete

Dr. Ali Turikia*
Dr. Nazih Mansor**
Ali Nooh***

(Received 1 / 11 / 2015. Accepted 10 / 1 / 2016)

□ ABSTRACT □

This research presents an experimental study about the effect of steel fibers on the main variables of stress- strain curve for high strength concrete on simple compression, which are: shape of stress- strain curve, ductility factor, energy absorption capacity. For this purpose, series of cylinders concrete specimens were prepared in compressive strength (70 MPa). the steel fiber with aspect ratio of $L/D = 70$ were added at the volume fractions of (0-1-1.5-2)%. The cylinders were tested under a monotonic loading at compression, and as a result of the tests, the total curve of stress- strain was obtained. The experimental results of research showed a positive effect of steel fibers on the behavior of high strength concrete, this effect increased with increasing volume fraction of steel fibers. It can be seen from stress-strain curve, whereas the slope of the ascending branch is not much affected. The descending branch of the stress- strain curve decreases by the increase in the fiber volume fraction. This means the ductility and toughness improve with the addition of steel fibers and as a result the behavior of high strength concrete has gone far away from being brittle as it is used to be.

Key words: high strength concrete, steel fibers, concrete behavior, ductility, toughness.

* Associate Professor - Department of Structural Engineering- Faculty of Civil Engineering Tishreen University- Lattakia- Syria.

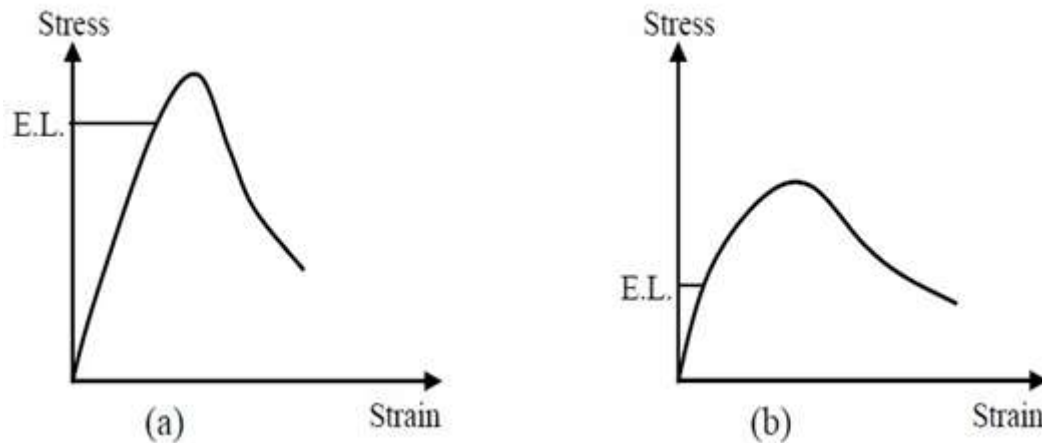
** Assistant Professor - Department of Structural Engineering- Faculty of Civil Engineering Tishreen University- Lattakia- Syria.

***Postgraduate Student- Department of Structural Engineering- Faculty of Civil Engineering Tishreen University- Lattakia- Syria.

مقدمة:

بعد أن أصبح الببتون عالي المقاومة (High strength concrete) أو ما يعرف اختصاراً (HSC) واسع الاستخدام كان هناك العديد من المحاولات لتعريف هذا النوع من الببتون، لكن حتى الآن لا يوجد مقياس محدد يستخدم لوصف الببتون عالي المقاومة. فقد أعطى العالم (Foster, 1994) تعريفاً للببتون عالي المقاومة بأنه الببتون المصنوع من مزيج من المواد المناسبة وفقاً لتصميم خاص للخلاطة الببتونية المحددة، وهذه المواد مخلوطة ومنقولة ومتوضعة ومتماسكة ومعالجة بشكل جيد وبذلك سيعطي الببتون الناتج أداء ممتاز في المنشأة [1]. وفقاً للدراسة التي أجراها الباحث (Breitenbucher, 1998) بين أن (HSC) هو الببتون عالي المقاومة بديمومة محسنة ومقاومة إضافية للببتون ضد الهجمات الفيزيائية والكيميائية [2]. بينما وضح الباحث (Russel, 1999) أن مفهوم الببتون عالي المقاومة هو الببتون الذي يجمع مجموعة خاصة من متطلبات التجانس والأداء والتي لا يمكن تحقيقها دائماً بشكل روتيني باستخدام المقومات التقليدية والخلط والتوضع والمعالجة العادية [3].

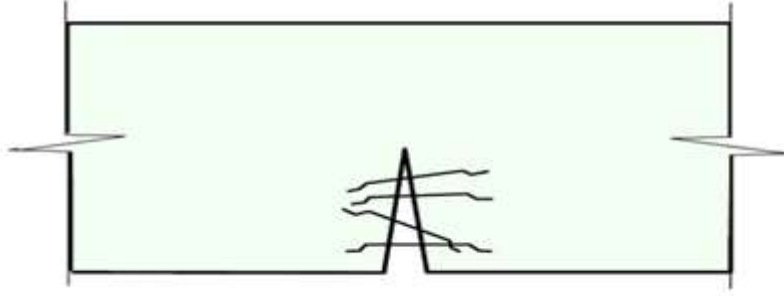
بينت العديد من الدراسات أهم مكامن القصور في خصائص الببتون عالي المقاومة، فعلى سبيل المثال أوضح الباحث (NILI, 2010) محدودية استخدام الببتون عالي المقاومة على الرغم من الخصائص التي يتمتع بها من { ديمومته الكبيرة (Durability) - نفاذيته المنخفضة - مقاومته الكبيرة على الضغط }، وذلك بسبب أن الببتون عالي المقاومة ينهار بشكل هش (Brittle) [4]. حيث أن العلاقة ما بين المقاومة والمطاوعة (Ductility) (والتي تعبر عن قابلية العنصر على إبداء تشوهات لدنة أكبر مع المحافظة على المقاومة)، هي علاقة عكسية كما يبدو من الشكل (1) حيث يدل الشكل (1-a) على سلوك الببتون عالي المقاومة بينما يدل الشكل (1-b) على سلوك الببتون العادي، وبمقارنة الشكلين يتبين أنه كلما زادت المقاومة تقل المطاوعة ويصبح الانهيار بشكل مفاجئ، وهذه هي المشكلة الأساسية في الببتون عالي المقاومة [5].



شكل (1) يوضح منحنى الإجهاد - تشوه: a- للببتون عالي المقاومة b- للببتون العادي [5]

قدمت العديد من الأبحاث حلولاً لتلافي هذا القصور في خصائص الببتون عالي المقاومة، فقد أكد الباحث [6] (SIVAKUMAR, 2011) والباحث [7] (MARAR, 2011) وآخرون وفي دراسات منفصلة أن أساليب استخدام الألياف التي تمتلك القدرة على تحسين مقاومة الببتون في الضغط والشد والانحناء والصدم والإنكماش أحد أبرز تلك الحلول، حيث أنها تعمل على تقليل اتساع الشقوق وإعادة توزيعها كما هو مبين بالشكل (2)، وأهم وظيفة للألياف هي أنها تزيد من متانة المادة (Toughness) زيادة كبيرة، حيث تعمل الألياف على تحويل ميكانيكية الإنهيار

للبيتون من انهيار مفاجئ Sudden Failure إلى انهيار تدريجي ومطواع Ductile Failure. يعمل التسليح الطولي على تقوية المادة باتجاه واحد أما الألياف تدعم المادة بكافة الاتجاهات [11].



الشكل (2) يوضح عمل الألياف في التقليل من اتساع الشقوق [11]

بينت الدراسات التجريبية كالدراسة التي أجراها الباحث [8] (BHARGAVA, 2005) والدراسة التي أجراها الباحث [6] (SIVAKUMAR, 2011) إمكانية استخدام عدة أنواع من الألياف نذكر أكثرها استخداماً وهي: الألياف الفولاذية، الألياف الزجاجية، الألياف الكربونية، ألياف البولي بروبيلين، وبينت أيضاً تلك الدراسات أن الألياف الفولاذية هي أفضل أنواع الألياف التي يمكن استخدامها لتحسين المطوعة.

أما على المستوى المحلي فقد ناقشت عدة دراسات بحثية إضافة الألياف إلى أنواع خاصة من البيتون كالدراسة التي أجراها الباحث (زينه، 2015) [12] والتي أظهرت تحسن في المقاومة على الضغط والمقاومة على الانعطاف وابتعاد سلوك البيتون ذاتي التوضع عن السلوك الهش وزيادة التحسن بزيادة كمية ألياف البولي بروبيلين المستخدمة، والدراسة التي أجرتها الباحثة (محمود، 2011) [13] فقد ناقشت فيها سلوك البيتون عالي المقاومة وأظهرت ضعفه الكامن بانهيائه الهش.

وعليه تم التوجه من خلال جملة الدراسات المرجعية العالمية والمحلية السابقة إلى تحسين سلوك البيتون عالي المقاومة وذلك بإضافة الألياف الفولاذية بطول (7 cm) وقطر (1 mm)، وذلك بهدف دراسة سلوك البيتون عالي المقاومة المسلح بألياف فولاذية.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة سلوك البيتون عالي المقاومة المسلح بألياف فولاذية (steel fibers) وذلك من خلال

دراسة:

- 1 تغيرات مخطط إجهاد _ تشوه تبعاً لتغير نسبة الألياف المستخدمة.
- 2 تأثير الألياف الفولاذية على مطوعة المادة.
- 3 تأثير الألياف الفولاذية على قدرة المادة على امتصاص الطاقة.

منهجية البحث:

أجرينا البحث باعتماد المنهجية التجريبية التالية: قمنا بإجراء التجارب المخبرية اللازمة على المواد الداخلة في تركيب الخلطة البيتونية عالية المقاومة، وذلك من أجل الاختيار الأمثل للمواد التي تحقق المقاومة المطلوبة

(70 MPa)، وبعد ذلك قمنا بتصميم الخلطة البيتونية المطلوبة، ومن أجل الوصول لهدف البحث تمت إضافة الألياف الفولاذية للخلطة البيتونية المصممة وفق النسب التالية (1,1.5,2) %، وتمت مقارنتها بالخلطة البيتونية المرجعية (بدون ألياف)، حيث قمنا بصب مجموعة من العينات الأسطوانية النظامية، وأجرينا اختبار الضغط البسيط عليها من أجل دراسة السلوك، ثم جمع النتائج وتحليلها ومناقشتها وصولاً إلى الاستنتاجات والتوصيات.

المواد المستخدمة:

يحضر البيتون عالي المقاومة باختيار دقيق للمواد الداخلة في تركيبه، وفي مايلي مواصفات المواد المستعملة في تركيب الخلطة البيتونية:

1. الإسمنت: على الرغم من الأهمية الكبرى للإسمنت المستعمل في البيتون عالي المقاومة، فقد استعملنا الاسمنت البورتلاندي صنف 42.5 MPa .
2. المضافات الاسمنتية: استعملنا غبار السيليكا في تركيب البيتون عالي المقاومة.
3. الملدن: استعملنا في جميع خلطات البيتون عالي المقاومة السوير ملدن Type G.
4. الماء: نظراً لأن متطلبات نوعية الماء في البيتون عالي المقاومة لا تختلف عنها في البيتون العادي. فقد استعملنا الماء الصالح للشرب.
5. الألياف الفولاذية: تمتلك الألياف الفولاذية القدرة على تقوية البيتون ومنع الانهيار المفاجئ، حيث تعمل على تقليل التشققات والحد من اتساعها أثناء عملية الانهيار [8]. ونظراً لعدم توفر الألياف الفولاذية المصنعة في الاسواق المحلية فقد حصلنا عليها من خلال تقطيع الكابلات الفولاذية لقطع صغيرة ذات طول محدد ثم تفريد هذه القطع إلى اسلاك فولاذية (شعيرات) تمتلك نفس الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للكابلات والواردة ضمن النشرة الفنية للجهة المصنعة، والموضحة في الجدول (1).

جدول (1) يبين الخصائص الفيزيائية للألياف الفولاذية المستخدمة

المادة	الطول mm	القطر mm	الوزن تقريباً t/m ³	مقاومة شد Mpa	عامل المرونة Gpa	الاستطالة %
اسلاك فولاذية	70	1	7.85	2200	200	2

6. الحصويات:

تكتسب الحصويات أهمية كبيرة في تأثيرها على مقاومة البيتون، فتؤثر خواصها الفيزيائية والميكانيكية تأثيراً مباشراً في هذه المقاومة، حيث استخدمت أربعة أنواع من الحصويات ذات تدرج حبي مناسب للحصول على أفضل اكتناز للخليط البيتوني:

- 1- البحص الخشن من حسياء بقطر يتراوح ما بين (6.7 الى 12) mm.
- 2- بحص متوسط الحجم من حسياء بقطر يتراوح ما بين (2.36 إلى 6.7) mm.
- 3- الرمل الخشن من حسياء بقطر اعظمي 2.36 mm.
- 4- الرمل الناعم من القرينتين بقطر اعظمي 0.6 mm.

طريقة العمل التجريبي:**• التجارب التي تم إجراؤها على المواد المكونة للخلطة البيتونية:**

يستلزم إنتاج البيتون عالي المقاومة فرض اشتراطات خاصة على اختيار المواد الداخلة في تركيبه أكثر مما هي عليه في حالة البيتون العادي. يتطلب الحصول على بيتون عالي المقاومة عدة اختبارات لتحديد مواصفات المواد الفيزيائية والميكانيكية الداخلة في تركيبه، لذلك قمنا بإجراء التجارب اللازمة على الحصويات المستخدمة وذلك لتقييم هذه الحصويات وتتضمن هذه التجارب:

- أ- تجربة التدرج الحبي للحصويات الخشنة والناعمة.
- ب- تجربة الوزن النوعي للحصويات الخشنة والناعمة.
- ج- تجربة المكافئ الرملي للحصويات الناعمة (تجربة المواد الناعمة كنسبة وزنية).
- د- تجربة الاهتراء (لوس انجلوس) للحصويات الخشنة.
- هـ- تجربة الوزن الحجمي الظاهري للحصويات الخشنة والناعمة.

• تصميم الخلطة البيتونية:

من أجل تصميم الخلطة البيتونية عالية المقاومة لابد من تحديد العوامل التي تساعد في رفع مقاومة البيتون، وأهم العوامل المؤثرة في رفع مقاومة البيتون هي تخفيض نسبة w/c ، وتعويض ذلك بإضافة المدونات، والاختيار الأمثل للتدرج الحبي الذي يعطي أكبر اكتناز ممكن. وتم الاعتماد على طريقة المعهد الأمريكي (ACI) لتصميم الخلطة البيتونية عالية المقاومة [9]. والجدول (2) يوضح مكونات الخلطة البيتونية عالية المقاومة التي توصلنا إليها.

جدول (2) يوضح مكونات الخلطة البيتونية في المتر المكعب

المقاومة الهدف Mpa	اسمنت Kg	بحص خشن Kg	بحص متوسط الحجم Kg	رمل خشن Kg	رمل ناعم Kg	غبار السيليكا Kg	ماء Kg	مضاف Type G Kg
70	475	690	460	325	210	70	164	9.5

وتم صب أربع عينات بنسب ألياف فولاذية معينة وموضحة بالجدول (3)، حيث أن أقصى نسبة ألياف تم استخدامها هي 2%، ولم يتم استخدام نسبة ألياف أعلى من ذلك لأن قابلية التشغيل تصبح معدومة، تتألف العينة من ثلاث نماذج أسطوانية نظامية بارتفاع 30 cm وقطر 15 cm، وبعد 28 يوم من صبها تم اختبارها على الضغط ورسم مخطط الإجهاد-تشوه لها. والشكل (3) يوضح مراحل عملية الصب وكيفية حفظ العينات المصبوبة.

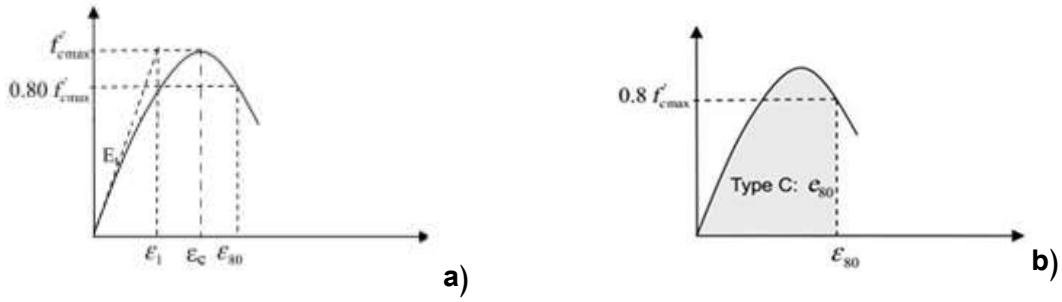
الجدول (3) يبين عدد العينات المراد اختبارها حسب المقاومة و نسبة الالياف الفولاذية

النسب الحجمية للألياف الفولاذية %				المقاومة Mpa
2	1.5	1	0	70
3 اسطوانية	3 اسطوانية	3 اسطوانية	3 اسطوانية	



الشكل (3) يوضح كيفية تحضير الخلطة البيتونية و عملية صب و حفظ العينات

- بينت الدراسة التي أجراها الباحث [10] (CUI, 2009) قيم المتغيرات الأساسية لمخطط الإجهاد - التشوه الناتج عن التحميل المستمر للبيتون والمبينة في الشكل (4) وذلك وفقاً لمايلي:
- الإجهاد والتشوه النسبي عند قيمة 0.8 من الإجهاد الأعظمي ويرمز له $(\sigma_{80} - \epsilon_{80})$: ويتم الحصول عليها من الفرع الهابط لمخطط الإجهاد- تشوه، ويمثل الإجهاد σ_{80} القيمة 0.8 من قيمة الإجهاد الأعظمي ويقابله التشوه المرافق وذلك في مرحلة الانهيار.
 - معامل المطاوعة μ_{80} : ويمثل النسبة بين التشوه المقابل لإجهاد الإنهيار σ_{80} والتشوه المقابل لنقطة تقاطع الإجهاد الأعظمي مع ميل المنحني في بدايته (ϵ_1) كما يظهر الشكل (4-a) والتي تعطى بالمعادلة :
- $$\mu_{80} = \frac{\epsilon_{80}}{\epsilon_1}$$
- معامل امتصاص الطاقة e_{80} : ويقاس من مخطط الإجهاد- تشوه بالمساحة المحصورة بين المخطط ومحور الإجهاد ومحور التشوه حتى التشوه ϵ_{80} ، كما يظهر الشكل (4-b).



الشكل (4) يوضح قيم المتغيرات الأساسية لمخطط الإجهاد - التشوه [10]

النتائج والمناقشة:

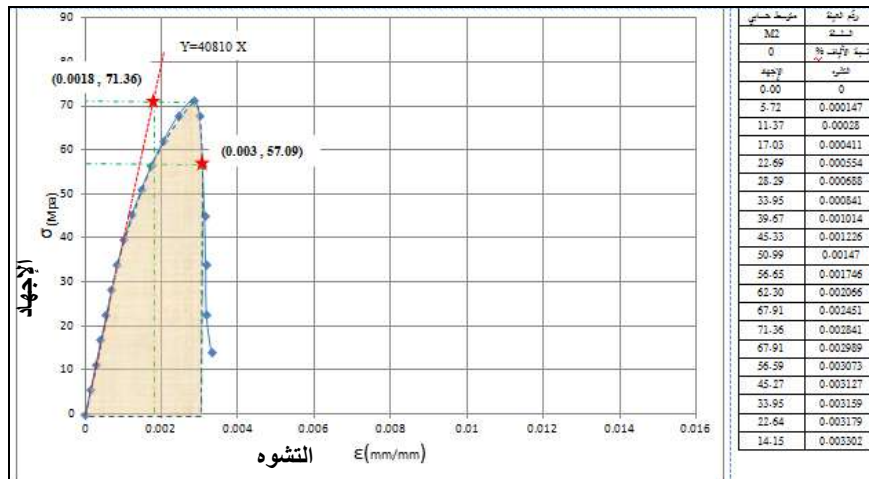
1. نتائج اختبار العينات الاسطوانية على الضغط البسيط عند عمر 28 يوم:

تم اختبار ثلاث عينات اسطوانية للخلطة الببتونية المصممة (70 Mpa)، وذلك لكل نسبة من الألياف الفولاذية تحت تأثير التحميل المستمر على الضغط. وذلك باستخدام جهاز الضغط البسيط الإلكتروني MATEST S.P.A المتوفر في مخابر كلية الهندسة المدنية في جامعة تشرين، والشكل (5) يوضح بعض العينات الأسطوانية أثناء تجهيزها للاختبار، ووصل أدوات القياس.

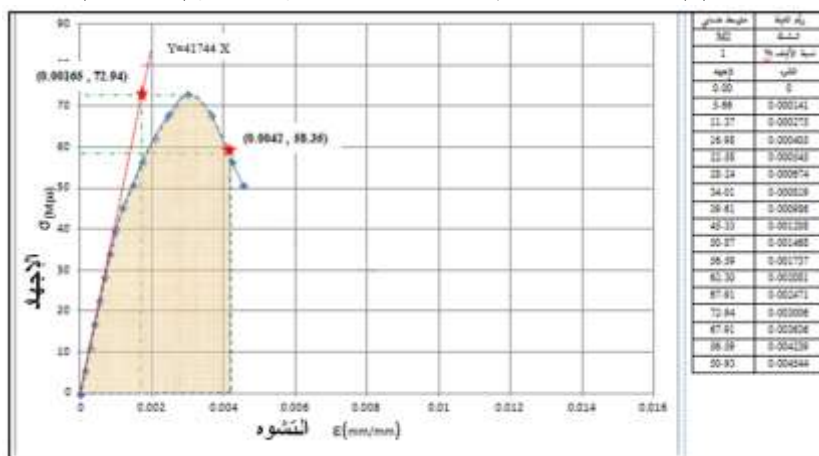


الشكل (5) يوضح العينات الاسطوانية أثناء تجهيزها للاختبار

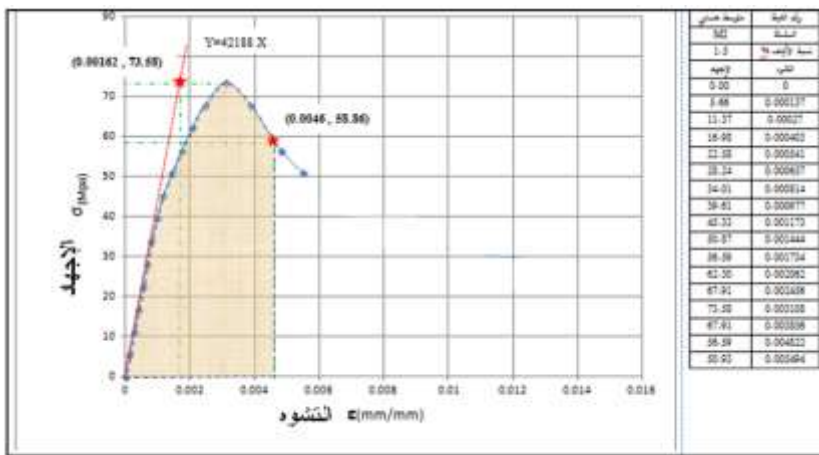
سنورد فيما يلي المخططات التجريبية الكاملة للإجهاد - التشوه من الخلطة الببتونية التي اختُبرت تحت تأثير التحميل المستمر، وذلك بعد أن تمت معالجة البيانات وإظهارها باستخدام برنامج الإكسل، حيث تم الاعتماد على المخطط التجريبي الوسطي لكل نسبة من الألياف الفولاذية وذلك من أجل تحديد المتغيرات الأساسية لمخطط الإجهاد- تشوه. وتبين الأشكال من الشكل (6) إلى الشكل (10)، متوسطات قيم الإجهاد- تشوه للعينات الأسطوانية:



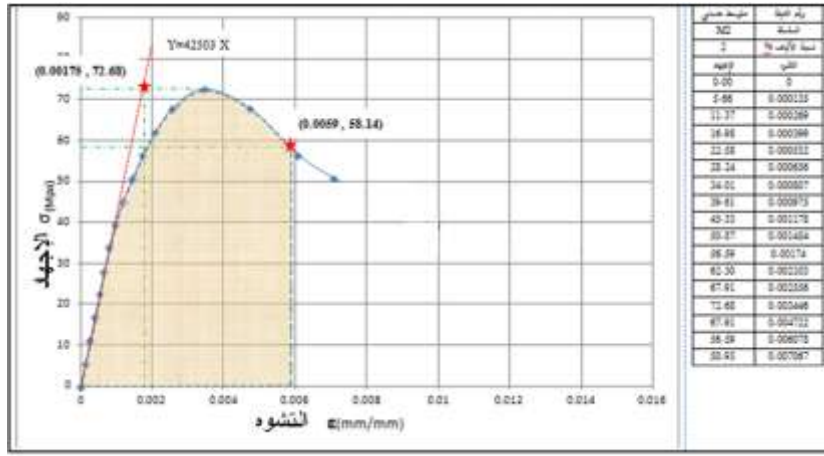
الشكل (6) مخطط متوسطات قيم الإجهاد - تشوه للعينات /1-2-3/ (بدون ألياف)



الشكل (7) مخطط متوسطات قيم الإجهاد - تشوه للعينات /4-5-6/ (بنسبة ألياف 1%)



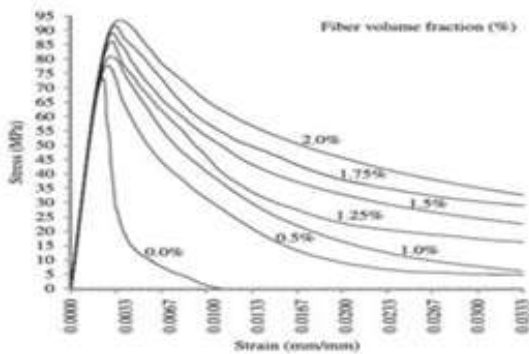
الشكل (8) مخطط متوسطات قيم الإجهاد - تشوه للعينات /7-8-9/ (بنسبة ألياف 1.5%)



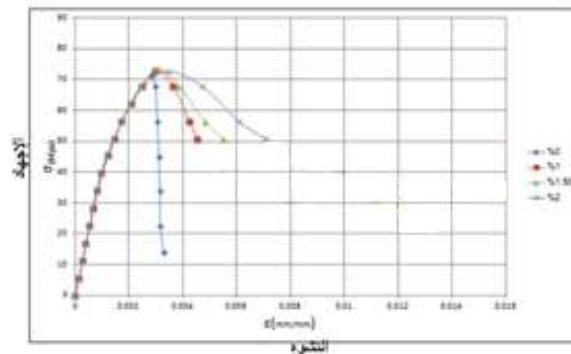
الشكل (9) مخطط متوسطات قيم الإجهاد- تشوه للعينات/10-11-12/ (بنسبة ألياف 2.0%)

بمقارنة المخططات السابقة يتبين لنا ومن خلال الشكل (6) أن العينات الببتونية بدون ألياف والمختبرة تحت حمولة الضغط لا تظهر أي مقاومة إضافية بعد الوصول إلى الحمولة الحدية، وتتهار بشكل مفاجئ، وهذا ما أكده الباحث [6](SIVAKUMAR, 2011) والباحث [7](MARAR, 2011) وآخرون وفي دراسات منفصلة على خاصية الهشاشة التي يتمتع بها الببتون عالي المقاومة. بإضافة الألياف الفولاذية للخلطة الببتونية فإن مخطط الإجهاد- تشوه يتغير كما هو موضح بالأشكال (7) و(8) و(9)، ومقدار هذا التغير يتأثر بنسبة الألياف الفولاذية المضافة، حيث يقل انحدار الجزء الهابط من المنحني وبالتالي تزداد المطاوعة كلما زادت نسبة الألياف الفولاذية في الخلطة وذلك ضمن النسب الحجمية للألياف التي قمنا بإضافتها، وهذا يتوافق مع ما توصل إليه الباحث [7](MARAR, 2011) والباحث [8](BHARGAVA, 2005) بخصوص تأثير الألياف على منحنى الإجهاد- تشوه.

ومن أجل توضيح أثر الألياف على مخطط الإجهاد- تشوه تمت مقارنة هذه المخططات مع بعضها كما هو موضح في الشكل (10) والذي يمثل مخطط مقارنة متوسطات قيم الإجهاد- تشوه للخلطة الببتونية، ومع النتائج التي توصل إليها الباحث [7](MARAR, 2011) أيضاً، ومن ثم تم إعداد الجدول (4) والذي يمثل قيم المتوسط الحسابي للمتغيرات الأساسية لمخطط الإجهاد- تشوه.



الشكل (10-b) مخطط مقارنة سلوك الببتون عالي المقاومة بنسب ألياف مختلفة حسب MARAR



الشكل (10-a) مخطط مقارنة متوسطات قيم الإجهاد- تشوه للخلطة الببتونية ضمن تجاربنا المخبرية

الجدول (4) يبين المتوسط الحسابي للمتغيرات الأساسية لمخطط الإجهاد- تشوه

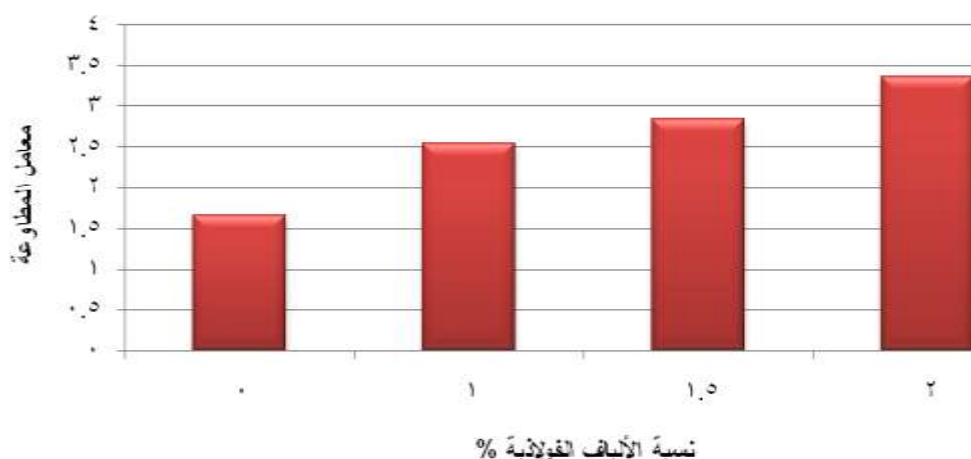
رقم السلسلة	نسبة الألياف الفولاذية %	$\bar{\sigma}_{80}$ MPa	$\bar{\epsilon}_{80}$ $\times 10^{-3}$	$\bar{\epsilon}_1$ $\times 10^{-3}$	$\bar{\mu}_{80}$	\bar{e}_{80} MPa
M2=70 MPa	0	57.09	3	1.8	1.667	0.158
	1	58.35	4.2	1.65	2.545	0.249
	1.5	58.86	4.6	1.62	2.840	0.305
	2	58.14	5.9	1.75	3.371	0.381

2. دراسة تأثير تغير نسب الألياف الفولاذية- لكل عينة- على معامل مطاوعة البيتون $\bar{\mu}_{80}$:

تؤدي إضافة الألياف الفولاذية الى الخلطة البيتونية إلى زيادة معامل مطاوعة البيتون، وتزداد بزيادة نسبة الألياف الفولاذية المضافة، وتبلغ ذروتها عند نسبة الألياف القصوى 2 % ضمن شروط التجربة، حيث أن إضافة نسبة ألياف فولاذية تزيد عن هذه النسبة تجعل قابلية التشغيل ضعيفة، كما هو مبين في الشكل (11) والجدول (5) الذي يوضح الزيادة في معامل مطاوعة البيتون تبعاً لنسبة الألياف الفولاذية المضافة.

الجدول(5) يبين مقدار تغير معامل مطاوعة البيتون بتغير نسب الألياف

نسبة الألياف الفولاذية %				السلسلة	M2
2	1.5	1	0		
3.371	2.84	2.545	1.667	$\bar{\mu}_{80}$	
102.22	70.37	52.67	-	الزيادة في معامل المطاوعة %	

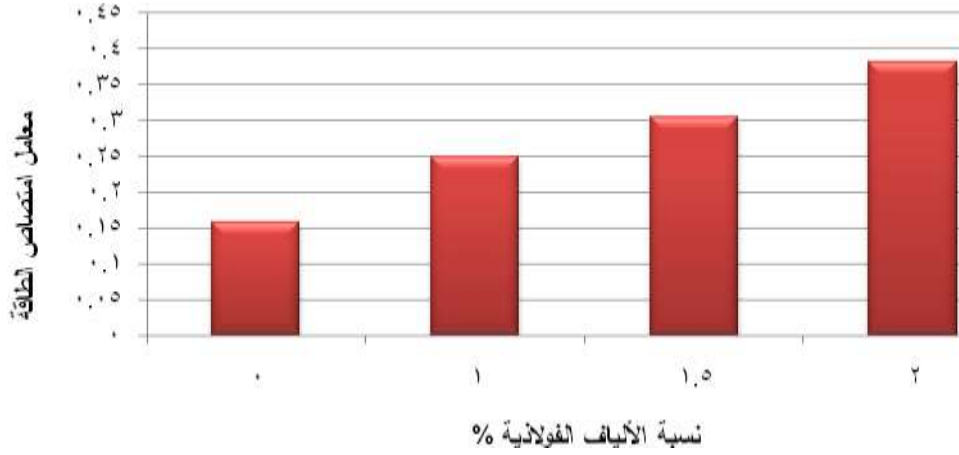


الشكل(11) يبين تغير معامل مطاوعة البيتون بتغير نسب الألياف المضافة

3. دراسة تأثير تغير نسب الألياف الفولاذية- لكل عينة- على معامل امتصاص الطاقة \bar{e}_{80} :

تؤدي إضافة الألياف الفولاذية الى الخلطة البيتونية إلى زيادة معامل امتصاص الطاقة، وهذه الزيادة تختلف باختلاف نسبة الألياف الفولاذية المضافة، وتبلغ ذروتها عند نسبة الألياف القصوى 2 % ضمن شروط التجربة، حيث

أن إضافة نسبة ألياف فولاذية تزيد عن هذه النسبة تجعل قابلية التشغيل ضعيفة، كما هو مبين في الشكل (12) والجدول (6) الذي يوضح الزيادة في معامل امتصاص الطاقة تبعاً لنسبة الألياف الفولاذية المضافة.



الشكل (12) يبين تغير قدرة المادة على امتصاص الطاقة بتغير نسب الألياف المضافة

الجدول (6) يبين مقدار تغير قدرة المادة على امتصاص الطاقة بتغير نسب الألياف

نسبة الألياف الفولاذية %				السلسلة	
2	1.5	1	0		
0.381	0.305	0.249	0.158	\bar{e}_{80} MPa	M2
141.14	93.04	57.6	-	الزيادة في معامل امتصاص الطاقة %	

الاستنتاجات والتوصيات:

استناداً إلى الدراسة و التجارب التي أجريناها يمكن التوصل للنتائج التالية:

- الأهمية الكبيرة لاستخدام الألياف الفولاذية في خلطات البيتون عالي المقاومة ، حيث تغير سلوك البيتون عالي المقاومة بشكل كامل، ويظهر ذلك في مخطط الإجهاد- تشوه، حيث أن الفرع الصاعد من المخطط يتغير بشكل طفيف بينما الفرع الهابط يتغير بشكل كامل، ويقل انحداره بزيادة كمية الألياف الفولاذية وبالتالي بيتعد البيتون عالي المقاومة عن السلوك الهش.
- تزداد مطاوعة البيتون بازدياد كمية الألياف الفولاذية وتبلغ قيمتها العظمى عند نسبة ألياف 2 % وتراوح قيم الزيادة ما بين 52.67 - 70.37 - 102.22 وذلك للنسب الفولاذية 1 - 1.5 - 2 % على التوالي.
- تزداد قدرة المادة على امتصاص الطاقة بازدياد كمية الألياف الفولاذية حتى نسبة ألياف 2% حجماً وتبلغ قيمتها العظمى عند هذه النسبة، وتراوح قيم الزيادة ما بين 57.6 - 93.04 - 141.14 وذلك للنسب الفولاذية 1 - 1.5 - 2 % على التوالي.
- تقوم الألياف الفولاذية بتحويل البيتون عالي المقاومة من مادة هشة غير صالحة للاستخدام في المنشآت الهندسية إلى مادة مطاوعة يمكن الاستفادة منها بشكل كبير.

والتوصيات الخاصة بالبيتون عالي المقاومة المسلح بألياف فولاذية:

1. ضرورة اجراء ابحاث خاصة بإضافة الألياف الزجاجية، الكربونية، البولي برويلين والألياف الهجينة (أكثر من نوع للألياف) للبيتون عالي المقاومة، ومقارنتها مع النتائج التي تم التوصل اليها باستخدام الألياف الفولاذية.
2. ضرورة ايجاد معادلة رياضية تعطي تعبيراً قريباً للسلوك الحقيقي للبيتون عالي المقاومة المسلح بألياف فولاذية تراعي نسب الألياف الداخلة في تصميم الخلطة.
3. العمل على دراسة تأثير الألياف الفولاذية على المقاومة المكعبية والمقاومة الإسطوانية وتحديد العلاقة بينهما.

المراجع :

- [1] FORSTER,S.W. *High-Performance Concrete-Stretching the Paradigm*. Concrete International, V. 16, No. 10, 1994, pp. 33-34.
- [2] – BREITENBÜCHER, I. R. *Development and applications of high-performance concrete*, Materials and Structures, V. 31, April 1998, pp. 209-215.
- [3] – RUSSEL, H. G. *ACI Defines High-Performance concrete*. Concrete International, V.21, No. 2, 1999, pp. 56-57.
- [4] – NILI, M. *combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete*, hamedan,Iran,2010.
- [5] BÜYÜKÖZTÜRK,O; LAU,D. *High Performance Concrete: Fundamentals and Application*. Cambridge,2004.
- [6]- SIVAKUMAR, A. *Influence of hybrid fibres on the post crack performance of high strength concrete* , India , 2011 , Vol. 2(7), pp. 147-159.
- [7]- MARAR, KH; EREN,Ö; YITMEN, İ . *Compression Specific Toughness of Normal Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (NSSFRC) and High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (HSSFRC)*. Turkey , 2011 , 14(2): 239-247
- [8]- BHARGAVA, P; SHARMA, U. K; KAUSHIK, S.K. *Compressive Stress – Strain Behavior Of Small Scale Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Cylenders* . Japan,2006.
- [9] - NAWY, E.G. *Reinforced Concrete Fundamental Approach*. 4 Sixth Edition , Prentice Hall, USA. (2005).
- [10] – CUI ,C " *behavior of normal and high strength concrete confined with fiber reinforced polymers (FRP)* " , university of toranto 2009 .
- <http://osp.mans.edu.eg/imam/Books/Book1/Ch5.pdf>[11]
- [12] – زينة، تمام؛ ججاج،غاندي؛ خيريك،علي . دراسة تأثير إضافة ألياف البولي برويلين إلى البيتون ذاتي التوضع بمواد محلية.بحث ماجستير،جامعة تشرين،2015.
- [13] – محمود، مها؛ منصور،نزيه؛ تركية،علي . مساهمة في دراسة سلوك البيتون عالي المقاومة المصنع بالظروف المحلية.بحث ماجستير،جامعة تشرين،2011.