A Study of the Effect of Steel Fibers Prepared From Cables on the Mechanical Properties of Concrete

Mirna SBHI*
Dr. Bassam HWAIJA**
Dr. Neman ISSA***

(Received 30 / 7 / 2025. Accepted 14 / 12 / 2025)

□ ABSTRACT □

Fibers of various types (steel, carbon, glass, polymeric, etc.) are used to improve the mechanical properties of concrete, particularly in terms of its tensile strength, toughness, and ability to reduce crack formation and propagation. Steel fibers are among the most commonly used materials in this field due to their ability to enhance the ductility and stiffness of concrete, in addition to improving its resistance to high temperatures. In this study, recycled steel fibers were obtained from crane cables, which were cut into predetermined lengths. A series of physical and mechanical tests were conducted to verify that the fibers met the requirements specified by relevant international standards and codes. Three different concrete mixes were prepared: one without fibers, one with V_f = 0.5% steel fibers by volume, and one with V_f = 0.75% steel fibers by volume. Cylindrical samples were tested for compressive strength, while reinforced concrete beams were subjected to four-point bending tests. The results showed that the use of steel fibers led to a significant improvement in compressive strength by up to12.6%, and an increase in deflection at failure by up to 17.8% (at V_f =0.75%), indicating an enhancement in the deformability and toughness of the concrete. These results demonstrate the feasibility of using recycled steel fibers from used decommissioned crane cables in engineering applications.

Keywords: concrete, steel fiber, compressive strength, deflections.

Copyright **:**Latakia University journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Postgraduate Student (Ph.D.), Department Of Structural Engineering, Latakia University (Formerly Tishreen), Latakia, Syria.**
** **Professor, Department Of Structural Engineering, Latakia University (Formerly Tishreen), Latakia, Syria.**
*** **Associate Professor, Department Of Structural Engineering, Latakia University (Formerly Tishreen), Latakia, Syria.**

دراسة تأثير الألياف الفولاذية المحضرة من الكابلات على الخواص الميكانيكية للبيتون

ميرنا صبحي *

د. بسام حويجة **

د. نعمان عيسى***

(تاريخ الإيداع 30 / 7 / 2025. قُبِل للنشر في 14/ 12 / 2025)

□ ملخّص □

تُوظف الألياف بمختلف أنواعها (الفولاذية، الكربونية، الزجاجية، البوليميرية وغيرها) في تحسين الخواص الميكانيكية للبيتون، لاسيما من حيث مقاومته للشد، ومتانته، وقدرته على الحد من تشكل التشققات وانتشارها. وتُعد الألياف الفولاذية من أكثر المواد استخداماً في هذا المجال نظرًا لقدرتها على تحسين مطاوعة البيتون وزيادة صلابته، بالإضافة إلى تعزيز مقاومته للحرارة العالية. في هذه الدراسة، تم استخدام ألياف فولاذية معاد تدويرها من كابلات رافعات معدنية، حيث جرى تقطيعها إلى أطوال محددة، وتم إجراء مجموعة من الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية للتحقق من توافق خصائصها مع المتطلبات التي تفرضها الكودات والمعايير الدولية ذات الصلة. تم إعداد ثلاث خلطات بيتونية بتركيبات مختلفة: بدون ألياف، وبإضافة ألياف فولاذية بنسبة (0.5 % و0.75% = V_f) من الحجم. خضعت العينات الأسطوانية لاختبار مقاومة الضغط، بينما خضعت الجوائز البيتونية المسلحة لاختبار الانعطاف بأربع نقاط. أظهرت النتائج أن استخدام الألياف الفولاذية أدى إلى تحسن ملحوظ في مقاومة الضغط بنسبة وصلت إلى 12.6%، وزيادة في السهوم عند الانهيار بنسبة بلغت 17.8% (عند V_f=0.75%)، مما يشير إلى تحسن في قابلية التشوه ومتانة البيتون. توضح هذه النتائج جدوى استخدام الألياف الفولاذية المعاد تدويرها من كابلات الرافعات المستهلكة والمنسقة في التطبيقات الهندسية المختلفة.

الكلمات المفتاحية: البيتون، ألياف فولاذية، مقاومة الضغط، السهوم.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* **طالب دراسات عليا (دكتوراه) – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– اللاذقية – سورية.**

** **أستاذ – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– اللاذقية – سورية.**

*** **أستاذ مساعد – قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– اللاذقية – سورية.**

مقدمة:

يعتبر البيتون مادة هشة ضعيفة المقاومة على الشد ذات سعة تشوهات قليلة لذلك يتم استخدام التسليح التقليدي من قضبان تسليح وأساور لمقاومة الشد والقص المتشكل. وأيضاً تستخدم العديد من الألياف كنوع أخر من التسليح في البيتون، وهي عبارة عن عناصر غير مستمرة موزعة عشوائياً ضمن الخلطة البيتونية.

تستخدم العديد من أنواع الألياف في التطبيقات البيتونية منها الزجاجية والكربونية والبوليميرية والفولاذية. تستخدم الألياف الفولاذية بشكل واسع لأنها تحسن متانة ومطاوعة العنصر البيتوني وتزيد مقاومته على الشد وهي أيضاً مقاومة للحريق. هناك العديد من مصادر هذه الألياف منها الألياف المصنعة الجاهزة ومنها الألياف المستخرجة من إطارات السيارات [1].

تكون الألياف الفولاذية المستخدمة في الخلطات البيتونية قصيرة وغير مستمرة وذات عامل شكل (L_f / d_f) (حيثL_f طول الليف و d_f قطر الليف) تتراوح قيمته من 30 إلى 100 وبطول من 6.4mm إلى 76mm ولها مقاطع عرضية مختلفة بحيث تتوزع عشوائياً ضمن الخلطة البيتونية [2]، حيث أظهرت معظم الاختبارات أن استخدام الألياف بعامل شكل (L_f / d_f) أكبر من 100 غالباً يسبب قابلية تشغيل غير كافية للخلطة البيتونية والتوزيع غير المنتظم للألياف أو الاثنين معاً في حال استخدام تقنيات الخلط العادية.

يحدد لكل نوع من الألياف نسبة حجمية أعظمية يمكن إضافتها للمتر المكعب من الخلطة البيتونية ففي حالة الألياف الفولاذية المستخدمة في خلطة بيتونية تحوي كميات عادية من الحصويات الخشنة من النادر أن تتجاوز النسبة الحجمية للألياف الفولاذية 1% (تقريباً 80Kg لكل متر مكعب)، وذلك نتيجة التصادم بين الألياف والحصويات الخشنة ضمن الخلطة البيتونية والذي بدوره يؤثر على قابلية تشغيل الخلطة، لذلك فإن النسب المثالية لهذه الألياف تتراوح من 0.3% إلى 1% من حجم البيتون وأما النسب الأعلى من الألياف يمكن استخدامها في أنواع خاصة من البيتون بدون أو بوجود كميات قليلة من الحصويات الخشنة [3].

أما مقاومة الشد للألياف الفولاذية المستخدمة في الخلطات البيتونية يشترط أن تتراوح بين MPa (2000–800) وفق [3].

إن البيتون المستخدم لخلطة بيتون حاوي على ألياف Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) هو نفسه نمط البيتون العادي مع تغيير نسب الخلط للحصول على قابلية تشغيل جيدة والحصول على كافة الفوائد للألياف (الاستفادة القصوى من الألياف)، وهذا يتطلب تحديد مقاس الحصويات والتدرج الحبي المثالي وزيادة محتوى الاسمنت وربما الحاجة لإضافة هباب الفحم أو إضافات أخرى لتحسين قابلية التشغيل، وأيضاً إن خلطات SFRC التي يمكن مزجها ووضعها بطريقة وبمعدات البيتون العادي يجب أن تحوي على نسبة ألياف تتراوح بين %(1.5–0.5) لأن النسب الأعلى للألياف %(10–2) بحاجة لاستخدام تقنيات أخرى مختلفة خاصة بوجود الألياف [4].

في هذا البحث تم إجراء دراسة تجريبية باستخدام ألياف فولاذية محضرة من كابلات الرافعات بعد تحديد جميع خواصها، حيث تم تصميم ثلاث خلطات بيتونية تحوي ألياف بنسبة % (0.75–0.5–0) من الحجم وتم تحضير عينات اسطوانية وجوائز مسلحة واختبارها على الضغط والانعطاف للتحقق من كفاءة هذه الألياف، بنتيجة هذه الدراسة تبين لدينا الجدوى من استخدام الألياف الفولاذية المحضرة من كابلات الرافعات وإمكانية استخدامها في التطبيقات الهندسية.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في استغلال الكابلات الفولاذية المستهلكة والمنسقة عبر إعادة تدويرها واستخدامها كمصدر بديل للألياف الفولاذية، مما يساهم في خفض كلفة المواد الإنشائية، وتقليل النفايات الصناعية، وتحقيق استدامة بيئية أكبر في قطاع البناء.

يهدف هذا البحث إلى التحقق من فاعلية الألياف الفولاذية المحضرة من كابلات الرافعات ومطابقتها للمواصفات التي تحددها الكودات العالمية بالإضافة إلى دورها في تحسين الخواص الميكانيكية للبيتون من مقاومة ضغط ومتانة وزيادة مطاوعة.

طرائق البحث ومواده:

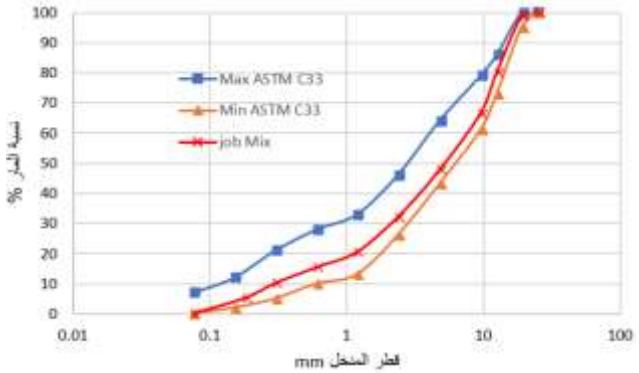
في هذا البحث تم إجراء دراسة تجريبية للتحقق من كفاءة الألياف الفولاذية المحضرة من كابلات الرافعات، حيث تم تصميم ثلاث خلطات بيتونية تحوي ألياف بنسب % (0–0.5–0.75) من الحجم وحضرت عينات اسطوانية لإجراء اختبار الضغط بالإضافة لصب جوائز مسلحة لاختبارها على الانعطاف بأربع نقاط.

1- الدراسة التجريبية (Experimental Study):

1-1- تحضير المواد وتحديد خواصها:

1-1-1- الحصويات:

تم استخدام حصويات بقطر أعظمي 19mm وحضر مزيج الحصويات ذو التدرج الحبي المبين بالشكل (1) الذي تمت مقارنته مع التدرج الحبي الذي يوصي به الكود ASTM C33 [5] والذي أعطى نتائج جيدة ومقبولة.



الشكل (1): مقارنة التدرج الحبي لحصويات الخلطة المصممة مع حزمة ASTM C33

1-1-2- الاسمنت:

استخدم الاسمنت البورتلاندي العادي ماركة $32.5N/mm^2$ والاسمنت مطابق للمواصفات القياسية السورية.

1-1-3- الملدن:

في هذه الدراسة استخدم ملدن عالي الأداء إلى الخلطة اسمه التجاري Flocrete SP 100 وذلك لتحسين قابلية تشغيل الخلطة البيتونية عند إضافة الألياف الفولاذية إليها، حيث تتراوح نسبته الوزنية 0.5–2% من الاسمنت المستخدم في الخلطة.

1-1-4- فولاذ التسليح:

تم اختبار ثلاث عينات لفولاذ التسليح وذلك لكل قطر قضيب تسليح على الشد البسيط لتحديد خواصه وتم ترتيب النتائج ضمن الجدول (1).

الجدول (1): نتائج اختبار الشد لعينات فولاذ التسليح

القطر (mm)	رقم العينة	التشوهات القصوى $\Delta L/L$	حد المرونة (N/mm^2)	حد الانقطاع (N/mm^2)
6	1	26%	239	299
	2	25%	241	302
	3	26%	242	305
8	1	21%	401	510
	2	20%	403	515
	3	19%	400	508
10	1	19%	403	515
	2	20%	405	520
	3	19%	402	510

بالتالي الفولاذ المستخدم محقق للشروط المطلوبة في تسليح العناصر الإنشائية.

1-1-5- الألياف الفولاذية:

في هذه الدراسة تم الحصول على الألياف الفولاذية من خلال تقطيع نوع خاص من الكابلات وكان ذلك الحل البديل بسبب صعوبة تأمينها في بعض البلدان وأيضاً للاستفادة من كمية الكابلات الفولاذية المستخدمة والتي لا حاجة لها (إعادة تدوير)، حيث تم تقطيع هذه الكابلات بأطوال متساوية 60mm وكان قطر الليف الواحد 1mm وبالتالي كان عامل الشكل لهذه الألياف L_f/d_f =60، يوضح الشكلين (2) و (3) الكابلات الفولاذية المستخدمة والألياف التي تم الحصول عليها.

الشكل (2): الكابلات المستخدمة في هذه الدراسة

الشكل (3): الألياف التي تم التوصل إليها

تم اختبار هذه الألياف في مخبر مقاومة المواد بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة اللاذقية لتحديد خواصها وذلك باستخدام جهاز الاختبار الرقمي الاوتوماتيكي بالكامل موديل (IBMU4 – 1000) والمبين بالشكل(4)، وأيضاً تم تحضير مقابض خاصة للعينات المختبرة لمنعها من الانزلاق عند مماسك الجهاز الهيدروليكية بسبب صغر قطرها حيث كان الطول الفعال للعينات المختبرة 250mm كما هو موضح بالشكل (5).

الشكل (4): جهاز اختبار شد الألياف

الشكل (5): عينة الليف المختبرة

بعد تحضير العينات تم وضعها في الجهاز وأجري اختبار الشد على ثلاث عينات من الألياف الفولاذية كانت سرعة التحميل 1KN/S، بنتيجة الاختبار تم تحديد مقاومة الشد لكل عينة كما هو موضح بالجدول (2).

الجدول (2): مقاومة الشد لعينات الألياف الفولاذية المختبرة

رقم العينة	العينة 1	العينة 2	العينة 3
المقاومة على الشد MPa	1573.7	1492.5	1523.2

وبالتالي يمكن اعتبار أن مقاومة الشد الوسطية للألياف التي تم الحصول عليها 1500MPa وهي محققة للمواصفات المطلوبة.

2-1- تصميم الخلطة البيتونية وتحضير العينات:

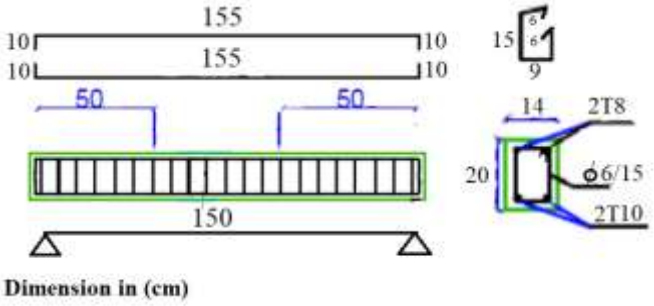
في هذه الدراسة تم تصميم خلطة بيتونية تحوي ألياف فولاذية بنسبة % (0–0.5–0.75) بمقاومة لاتقل عن 25MPa مع درجة تشغيل جيدة (مخروط ابراهامس A = 7–9 cm)، استخدم فيها بحص خشن وناعم (مقاس أعظمي للبحص 19mm) ورمل ناعم وطبيعي بالإضافة لملدن فائق الأداء Flocrete SP 100 وذلك لتحسين قابلية تشغيل الخلطة البيتونية عند إضافة الألياف الفولاذية إليها، كما هو موضح بالجدول (3).

الجدول (3): الخلطة المصممة في هذه الدراسة

المادة	النسبة الحجمية للألياف V_f%		
	0	0.5	0.75
	الكميات Kg/m^3		

الاسمنت		400	400	400
الماء		200	200	200
البحص	G1(10-19mm)	180	180	180
	G2(2-12.5mm)	850	850	850
الرمل	S1(0-5mm)	350	350	350
	S2(0-1.18mm)	400	400	400
الألياف		-	39	58
الملدن		2	6	7
الكثافة النظرية		2382	2425	2445

تم صب العينات مباشرةً فور الانتهاء من الخلط والتي كانت عبارة عن تسعة عينات اسطوانية نظامية قطرها 15cm وارتفاعها 30cm (ثلاثة اختبرت بعمر 7 أيام وثلاثة بعمر 28 يوم وثلاثة بعمر 55 يوم) بالإضافة لجائز أبعاد مقطعه العرضي 14x20cm ومجازه 150cm مسلح بتسليح طولي 2T10mm حد الخضوع لفولاذ التسليح 400MPa وتسليح تعليق 2T8mm حد الخضوع لفولاذ التسليح 400MPa بالإضافة لأساور Ø6mm/15cm ذات حد خضوع 240MPa، كما هو موضح بالشكل (6)، وذلك لكل خلطة والتي كانت خلطة بدون الياف (MC-0) وخلطة تحوي ألياف بنسبة 0.5% (MFC-0.5) وأيضاً خلطة تحوي ألياف بنسبة 0.75% (MFC-0.75) كما هو مبين بالجدول (4).



الشكل (6): أبعاد الجائز وترتيبات التسليح

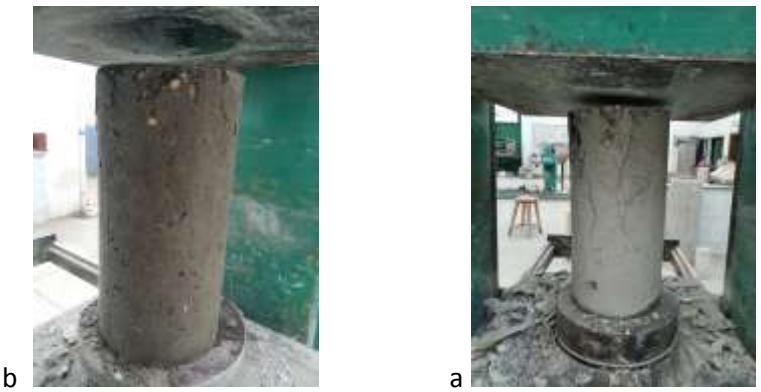
الجدول (4): تسميات الخلطات والعينات المستخدمة في هذه الدراسة

نوع الخلطة	تسمية الخلطة	العينة الاسطوانية الأولى	العينة الاسطوانية الثانية	العينة الاسطوانية الثالثة	الجائز
بدون ألياف	MC-0	SC-0-1	SC-0-2	SC-0-3	BC-0
بوجود ألياف بنسبة 0.5%	MFC-0.5	SFC-0.5-1	SFC-0.5-2	SFC-0.5-3	BFC-0.5
بوجود ألياف بنسبة 0.75%	MFC-0.75	SFC-0.75-1	SFC-0.75-2	SFC-0.75-3	BFC-0.75

النتائج والمناقشة:

1- اختبار الضغط للعينات الاسطوانية:

تم إجراء اختبار الضغط على ثلاث عينات اسطوانية من كل خلطة بعمر7 أيام وأيضاً ثلاث عينات اسطوانية بعمر 28 يوم والباقي تم اختباره بعمر55 يوم، حيث لوحظ من خلال الاختبار أن العينات الحاوية على ألياف حافظت على شكلها عند الانهيار بينما العينات دون ألياف فكانت التشققات فيها واضحة عند انهيار العينة وهذا بسبب دور الألياف في ربط التشققات المتشكلة ضمن الكتلة البيتونية ويظهر ذلك من خلال الشكل (7)، تم تنظيم نتائج اختبار الضغط للعينات الاسطوانية كما هو موضح بالجدول (5).

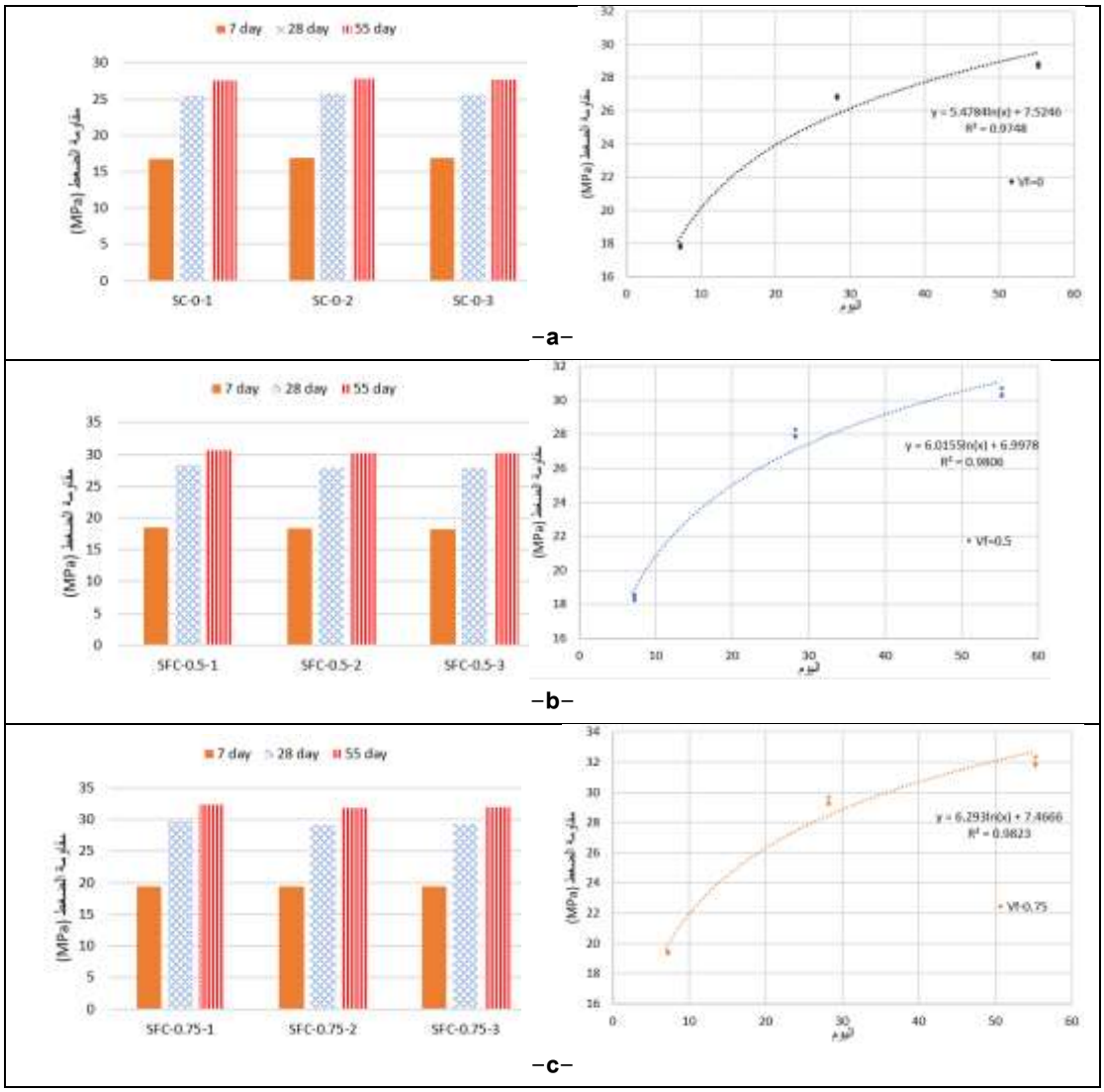


الشكل (7): أنماط انهيار العينات الاسطوانية -a- دون ألياف -b- بوجود ألياف

الجدول (5): نتائج اختبار الضغط

نوع الخلطة	تسمية العينة	مقاومة الضغط بعمر 7 أيام (MPa)	مقاومة الضغط بعمر 28 يوم (MPa)	مقاومة الضغط بعمر 55 يوم (MPa)
دون ألياف MC-0	SC-0-1	16.76	25.47	27.51
	SC-0-2	16.93	25.76	27.79
	SC-0-3	16.84	25.59	27.63
بوجود ألياف بنسبة 0.5% MFC-0.5	SFC-0.5-1	18.53	28.3	30.62
	SFC-0.5-2	18.4	27.85	30.19
	SFC-0.5-3	18.22	27.91	30.28
بوجود ألياف بنسبة 0.75% MFC-0.75	SFC-0.75-1	19.4	29.69	32.36
	SFC-0.75-2	19.45	29.22	31.8
	SFC-0.75-3	19.33	29.32	31.93

يبين الشكل (8) مقارنة تغير مقاومة الضغط للعينات الأسطوانية لكل خلطة على حدى (بدون ألياف – بوجود ألياف بنسبة 0.5% – بوجود ألياف بنسبة 0.75%) مع مرور الزمن بدءاً من عمر 7 أيام وحتى الوصول إلى مقاومة الضغط بعمر 28 يوم و55 يوم.



الشكل (8): تغير مقاومة الضغط للعينات الاسطوانية بعمر 7 و 28 و55 يوم –a– دون ألياف–b– ألياف بنسبة 0.5% –c– ألياف بنسبة 0.75%

مما سبق نلاحظ أن إضافة الألياف الفولاذية للخلطة البيتونية بنسبة 0.5% قد زاد من مقاومة الضغط بحوالي 8.6% بينما إضافة الألياف بنسبة 0.75% قد حسن مقاومة الضغط بنسبة 12.6%. ويظهر أيضاً من خلال هذه النتائج أن نسبة زيادة مقاومة الضغط للعينات الأسطوانية دون ألياف من عمر 7 أيام لعمر28 يوم كانت 51.9% بينما ازدادت مقاومة الضغط للعينات الأسطوانية الحاوية على ألياف بنسبة 0.5% بمقدار 52.4% أما نسبة زيادة مقاومة الضغط للعينات الأسطوانية الحاوية على ألياف بنسبة 0.75% فقد كانت 51.7% ، أما نسبة زيادة مقاومة الضغط للعينات الأسطوانية دون ألياف والحاوية على ألياف بنسبة 0.5% والحاوية على ألياف بنسبة 0.75% من عمر 28يوم إلى 55 يوم فقد كانت 7.5%، 7.7%، 8.1% على الترتيب. يمكن التعبير عن هذه النتائج من خلال النموذج الرياضي

اللوغاريتمي الذي يعبر عن تغير مقاومة الضغط من عمر 7 إلى 55 يوم عند تغير نسبة الألياف 0% و 0.5% و0.75% و ذلك من خلال العلاقات (1) و (2) و (3) على الترتيب:

$$y = 5.4001 \ln(x) + 6.6503 \quad (1)$$

$$y = 5.9811 \ln(x) + 7.0765 \quad (2)$$

$$y = 6.293 \ln(x) + 7.4666 \quad (3)$$

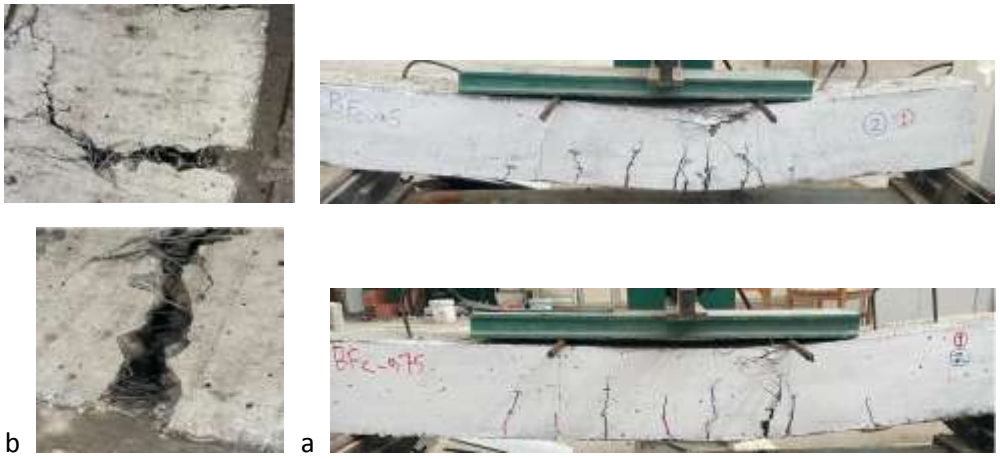
يعكس هذا النموذج التطور السريع للمقاومة في المراحل الأولى وأيضاً التطور التدريجي البطيء بعد 28 يوم حيث تمثل y مقاومة الضغط (MPa) بينما x هو عمر العينة بالأيام, حيث بلغت قيمة عامل الترابط (R^2) لجميع النماذج أكثر من 0.97 مما يدل على ملائمة النموذج لتمثيل سلوك تطور المقاومة مع الزمن بدقة عالية. نلاحظ أن العدد الثابت في العلاقات والذي يمثل المقاومة الأولية يزداد بزيادة نسبة الألياف، ونلاحظ أيضاً أن أمثال الدالة اللوغاريتمية التي تمثل ميل المنحني وتعبر عن مقدار نمو مقاومة الضغط مع الزمن تزداد بزيادة الألياف، بالتالي فإن للألياف دور في زيادة المقاومة الأولية للبيتون على الضغط وأيضاً تساهم في زيادة معدل نمو المقاومة مع الزمن من خلال ربط التشققات وزيادة تماسك الكتلة البيتونية.

2- اختبار الانعطاف بأربع نقاط للجوائز البيتونية المسلحة:

أجري اختبار الانعطاف بأربع نقاط على الجوائز المحضرة في هذه الدراسة باستخدام مكبس هيدروليكي بحمولة (100KN) وسرعة تحميل (2KN/Sec)، كما هو موضح بالشكل (9).

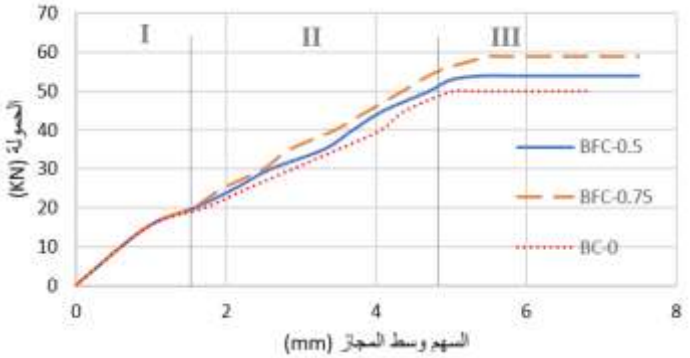
الشكل (9): تطبيق القوة ضمن جهاز الاختبار

نلاحظ أن الجوائز المختبرة انهارت على الانعطاف كما هو مصمم لها حيث تشكلت مجموعة من تشققات الانعطاف المتعامدة مع محور الجائز في المنطقة الوسطية وهي منطقة العزم الأعظمي المطبق حيث سلكت هذه الجوائز سلوكاً مشابهاً لبعضها من حيث تطور جبهة التضرر، كما هو مبين بالشكل (10). كان للجوائز المختبرة استجابة متماثلة تقريباً باعتبار لها نفس الأبعاد وخواص المواد ونسب التسليح الطولي مع اختلاف نسبة الألياف الفولاذية المستخدمة ضمن الخلطة فقط، ففي الجائز BC-0 ظهر الشق الأول عنو الوصول للحمولة 13KN وحدث الانهيار عند الحمولة 49KN، أما الجائز BFC-0.5 ظهر الشق الأول عند الحمولة 15.8KN وانهار الجائز عند الحمولة 53KN بسبب وصول فولاذ التسليح الطولي لحد الخضوع وتم الاستمرار بالتحميل حتى تحطم البيتون المضغوط، أما الجائز BFC-0.75 فقد كانت بداية التشقق عند القوة 22KN وحصل الانهيار عند القوة 58KN أيضاً نتيجة وصول فولاذ التسليح الطولي إلى حد الخضوع، كما يظهر الشكل (11).



b a

الشكل (10): a نمط تشقق الجوائز المدروسة (جبهة التضرر) b الألياف ضمن التشققات



الشكل (11): منحني حمولة – سهم وسط المجاز للجوائز المدروسة

نلاحظ أن للجوائز المدروسة سلوكاً متقارباً لكن مع زيادة مطاوعة (طاقة التشوهات) للجائز الذي يحوي نسبة ألياف أعلى حيث ازدادت قدرة تحمل الجائز وقلت قيم السهوم الموافقة عند كل مرحلة تحميل خصوصاً في المرحلة التي تبدأ فيها الكتلة البيتونية بالتشقق حيث يدخل تأثير الألياف في ربط التشققات والتقليل من انتشارها، وبنتيجة ذلك يمكن تقسيم المراحل التي يستجيب فيها الجائز إلى:

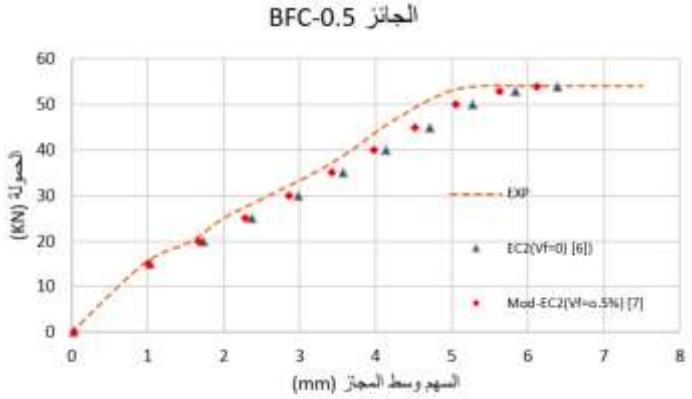
i. المرحلة الأولى: وهي المرحلة من بداية التحميل حتى ظهور أول التشققات يكون فيها للجوائز نفس الاستجابة حيث لا يدخل تأثير الألياف في هذه المرحلة ويكون سلوك الجائز مرن بشكل كامل أي أن إجهاد الشد الأعظمي في الجائز أقل من مقاومة البيتون على الشد بالانعطاف بالتالي يكون الجائز غير متشقق، ويكون ميل المنحني كبير (قيم سهوم قليلة).

ii. المرحلة الثانية: تبدأ من ظهور الشق الأول حتى الوصول إلى أقصى حمولة يتحملها الجائز في هذه المرحلة تأخذ التشققات بالانتشار ضمن الجائز وهنا يدخل تأثير الألياف في ربط التشققات والحد من انتشارها وبالتالي يختلف سلوك كل جائز بحسب نسبة الألياف المستخدمة فيه. في هذه المرحلة يقل ميل المنحني وتزداد قيم السهوم بسبب زيادة التشققات ضمن الكتلة البيتونية وبالتالي كلما كانت نسبة الألياف أكبر كان ميل المنحني في هذه المرحلة أكبر والسهوم

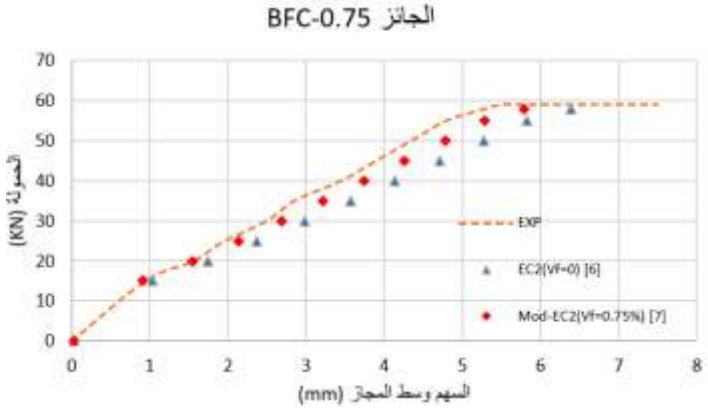
عند كل مرحلة تحميل أقل بسبب مساهمة الألياف في ربط التشققات والحد من انتشارها، ونلاحظ أيضاً أن هذه المرحلة تكون أطول كلما كانت نسبة الألياف أكبر وهذا يدل على زيادة المطاوعة.

iii. المرحلة الثالثة: تبدأ هذه المرحلة من نهاية المرحلة الثانية حتى نهاية التحميل وانهيار الجائز حيث تظهر التشققات النهائية في الجائز وتحدد نمط الانهيار من خلال شكلها وطريقة توزعها. في هذه المرحلة يكون ميل المنحني شبه معدوم بسبب السهوم الكبيرة الحاصلة مع التزايد الطفيف للحمولة وذلك بسبب انتشار التشققات بشكل كبير وتشكل مفصل لدن وانهيار الجائز.

بعد ذلك تم مقارنة السهم التجريبي عند كل مرحلة تحميل مع السهم الذي تعطيه علاقة الكود الأوروبي EC2 دون ألياف [6] وأيضاً مع النموذج المعدل لعلاقة الكود الأوروبي الذي يأخذ تأثير الألياف وميكانيك التصدع بعين الاعتبار والذي تم نشره في مقالة سابقة [7]، كما يظهر بالشكلين (12) و (13)، حيث تم توضيح العلاقتين بالجدول (6).



الشكل (12): مقارنة السهوم التجريبية مع السهوم التي تعطيها علاقة الكود الأوروبي والنموذج المعدل الجائز BFC−0.5



الشكل (13): مقارنة السهوم التجريبية مع السهوم التي تعطيها علاقة الكود الأوروبي والنموذج المعدل الجائز BFC−0.75

الجدول (6): علاقة الكود الأوروبي لحساب التقعر الوسطي الذي يستخدم لحساب السهم وفق EC2 [6] والتعديل المقترح لإدخال تأثير الألياف وخصائص التصدع [7]

التقعر الوسطي وفق EC2	ارتفاع منطقة الضغط x عزم عطالة المقطع المتشقق I_{cr}	المرجع
$(\frac{1}{r}) = \xi\,(\frac{1}{r})_{cr} + (1-\xi)\,(\frac{1}{r})_{un}$	$x=\frac{A_s \cdot f_y}{0.5\,b\,.f_c}$ $I_{cr}=\frac{b.\,x^3}{3} + n.A_s\,.(d-x)^2$	[6]

[7]	$x = \frac{0.3\, b\,.h\,.V_f\,.\alpha\,.\,\frac{L_f}{d_f}\,.\sqrt{f_c'}\,+\,A_s\,.\,f_y}{0.425\, b\,.f_c' - 0.185\, b + 0.3\, b\,.\,V_f\,.\,\alpha\,.\,\frac{L_f}{d_f}\,.\sqrt{f_c'}\,.(1+\frac{0.66}{\sqrt{f_c'}})}$ $I_{cr} = \frac{b.x^3}{3} + \frac{b.x'^3}{3} + n.A_s.(d-x)^2 + \frac{1}{3}n_f.\eta.b.V_f(h-x-x')^3$	
حيث: n أمثال التعادل لفولاذ التسليح الطولي، n_f أمثال التعادل للألياف، η عامل مساهمة الألياف يأخذ القيمة 0.16 في حالة كامل المقطع حاوي على ألياف، x' ارتفاع منطقة البيتون المشدود غير المتشقق		

نلاحظ أن هناك توافقاً جيداً بين النتائج التجريبية والنموذج المعدل للكود الأوروبي بالمراحل المختلفة من التحميل بالمقابل تظهر القيم التي يعطيها الكود الأوروبي EC2 انحرافاً واضحاً عن السلوك الفعلي، حيث وصلت الفروقات بين القيم التي تعطيها علاقة الكود الأوروبي والنتائج التجريبية إلى 17.8% بينما كانت الفروقات بين القيم التي يعطيها النموذج المعدل للكود الأوروبي والنتائج التجريبية وصلت ل 7.9% وذلك بسبب إدخال مساهمة الألياف في سلوك الشد للبيتون، وهذا يبين فعالية هذه الألياف في تحسين صلابة ومتانة البيتون.

الاستنتاجات والتوصيات:

في هذا البحث تم إجراء دراسة تجريبية على عينات اسطوانية وجوائز بيتونية مسلحة حاوية على ألياف فولاذية محضرة من كابلات الرافعات بنسبة % (0.75− 0.5 −0)، حيث اختبرت على الضغط والانعطاف على الترتيب، وبنتيجة هذه الدراسة تبين أن:

- يمكن استخدام الألياف الفولاذية المعاد تدويرها من كابلات الرافعات في الخلطات البيتونية كمادة تسليح فعالة.
- تحسن هذه الألياف مقاومة الضغط بنسبة تصل إلى 8.6% عند إضافتها بنسبة 0.5% وبنسبة 12.6% عند إضافتها بنسبة 0.75%.
- تساهم هذه الألياف بشكل فعال في الحد من التشققات وزيادة مطاوعة الجوائز البيتونية المسلحة تحت الانعطاف.

نوصي في نهاية هذا البحث ب:

- تشجيع استخدام الألياف الفولاذية المحضرة من كابلات الرافعات كخيار فعال من حيث الأداء والتكلفة، خصوصاً في الدول التي تواجه صعوبة في تأمين الألياف الجاهزة، وذلك دعماً لاستراتيجيات الاستدامة وإعادة التدوير.
- تطوير نماذج تصميم محلية تأخذ الألياف بعين الاعتبار نظراً للفروقات الكبيرة بين النتائج التجريبية والنموذج التقليدي للكود الأوروبي.

References:

[1] R. Hafiz and A. Rahmeh, *Study Mechanical Behavior Of Concrete Enhanced With Additives (Steel Fiber Extracted From Waste Tire)*, PhD Thesis, Faculty Of Civil Engineering, University Of Damascus, In Arabic, 2015.

[2] ACI Committee 544, State-of-The-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 5441. R-96 reapproved, 2002.

[3] Cement Concrete & Aggregates Australia. Guide to concrete construction. Part II-Section7: Fibres for concrete. Version 1.0. Mascot, NSW: Cement Concrete & Aggregates Australia, 2020.

[4] ACI Committee 544. Design considerations for steel fiber reinforced concrete. ACI 544.4R-88 (Reapproved 1999). Farmington Hills (MI): American Concrete Institute, 1988.

[5] ASTM International. ASTM C33/C33M-08: Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2008.
[6] Code, Price. Eurocode 2: design of concrete structures- part 1-1: general rules and rules for buildings. British Standard Institution, London .2005.
[7] M. Sbhi, B. Hwaija and N. Issa, *Contribution to introducing the effect of fibers and fracture properties on Eurocode formula to determine the deflection of steel fiber reinforced concrete beams*, Journal Of Latakia University For Research and Scientific Studies, Engineering Sciences Series, Vol.46, No. 5, in Arabic, 2024.