

نمذجة رياضية لسلوك الخرسانة المعززة بالألياف الفولاذية الإبرية على الضغط

الدكتور عفيف رحمة*

ريم حافظ**

(تاريخ الإيداع 13 / 10 / 2014. قُبل للنشر في 29 / 12 / 2014)

□ ملخص □

ما زالت الجهود العلمية والصناعية تسعى لتحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة بما في ذلك قدرتها على استهلاك الطاقة الخارجية المقدمة وتحقيق سعة أكبر من التشوهات. ضمن هذه المساعي تأتي محاولة إغناء الخرسانة بكمية من الألياف المعدنية التي أثبتت التجارب والدراسات أهمية دورها في تحسين مقاومة الخرسانة المنتجة المعززة بالألياف المعدنية على الضغط والشد والصدم وتحسين المطاوعة التي ساعدت في التطبيقات الإنشائية بشكل أفضل. في هذا البحث واعتماداً على مجموعة من التجارب والاختبارات التي تم إنجازها على الخرسانة المعززة بالألياف الفولاذية المستخرجة من إطارات المطاطية المستهلكة للسيارات، اقترحنا نماذج رياضية لتوصيف العلاقة التي تربط بين مقاومة الخرسانة وكل من عيار الإسمنت ونسبة الألياف من خلال مؤشرين أساسيين هما المقاومة على الضغط والمتانة، كما اقترحنا نماذج رياضية لحساب الطاقة المبددة على الضغط باعتبارها المؤشر الأمثل لاستقرار متانة الخرسانة ودرجة مطاوعتها انطلاقاً من كمية الإسمنت ونسبة حجم الألياف المعدنية في الخلطة البيتونية .

الكلمات المفتاحية: الألياف الفولاذية، مقاومة الخرسانة، الطاقة الممتصة، المتانة، قرينة المتانة.

* أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق-دمشق - سورية.

** ماجستير - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق-دمشق - سورية.

Mathematical Modeling of Behavior of Concrete Enhanced by Needle Steel Fiber under Compression

Dr. Afif Rahma*
Reem Hafez**

(Received 13 / 10 / 2014. Accepted 29 / 12 / 2014)

□ ABSTRACT □

Scientific and industrial efforts are devoted to improve the mechanical properties of concrete and transform this brittle material to ductile material and improve its ability to consume the supplied energy and achieve large deformation. One such effort is the enrichment of the concrete by the steel fiber whose experience and research studies have shown the importance of its role in improving the compressive and tensile strength and the impact, more also its plasticity that allow a best structural applications.

In this paper, depending on a range of experiments and tests that have been performed on concrete reinforced with steel fibers extracted from tire-consuming cars, we suggest mathematical models to characterize the relationship between concrete resistance and both of the quantity of cement and the volume percentage of fiber, through two indicators: the compressive strength and the toughness, as we propose mathematical models to estimate the strength of concrete and the degree of its ductility from the amount of cement and the volume ratio of the steel fibers in the concrete mix.

Keywords: Steel Fibers; Concrete Compressive Strength; Energy Absorption; Toughness; Toughness Index.

* Professor; Department of Structural Engineering; Faculty of Civil Engineering; University of Damascus; Damascus, Syria.

** PhD.; Member of Teaching Staff; Faculty of Civil Engineering; University of Damascus, Damascus, Syria

المقدمة:

من عيوب الخرسانة صفتها الهشة المتمثلة باستهلاكها للطاقة المقدمة بسعة ضعيفة من التشوهات. ضمن هذا المنظور سعت الدراسات وما زالت تسعى لتحسين خصائصها الميكانيكية بإضافة الألياف الى بنيتها لتحسين مطاوعتها وزيادة متانتها على الضغط وقدرتها في مقاومة الشد والصدم.

أهمية البحث وأهدافه:

ما زالت الجهود العلمية والصناعية تسعى لتحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة بما في ذلك قدرتها على استهلاك الطاقة الخارجية المقدمة وتحقيق سعة أكبر من التشوهات. ضمن هذه المساعي تأتي محاولة إغناء الخرسانة بكمية من الألياف المعدنية التي أثبتت التجارب والدراسات على أهمية دورها في تحسين مقاومة الخرسانة المنتجة المعززة بالألياف المعدنية على الضغط والشد والصدم وتحسين المطاوعة التي ساعدت في التطبيقات الإنشائية بشكل أفضل.

تستخدم الألياف الفولاذية بشكل عام في العديد من التطبيقات مثل استخدامها في أرضيات المعامل للحد من الأضرار الناجمة عن الاهتزاز والصدم. كذلك امكانية استخدامها في أساسات الآلات للحد من الأضرار الناجمة عن الاهتزازات والأحمال الديناميكية. واستخدامها في طبقات الرصف للطرق ومهابط المطارات كطبقة تغطية للحد من التشققات.

في هذا البحث واعتماداً على نتائج الاختبارات التجريبية التي شكلت جزءاً من هذا البحث، يستعرض تأثير إضافة الألياف الفولاذية إبرية الشكل، بنسب مختلفة، إلى الخلطة الخرسانية، كما يقترح نماذج رياضية لتوصيف العلاقات التي تربط بين مقاومة الخرسانة وكل من عيار الاسمنت ونسبة الألياف من خلال مؤشرين أساسين هما قوة تحمل للخرسانة وتشوهها.

منهجية البحث:

للوصول إلى علاقات رياضية عامة تمثل سلوك الخرسانة المعززة بالألياف المعدنية الإبرية كان من الضروري تنفيذ تجارب تغطي أوسع مساحة من الاحتمالات الممكنة من تغير في نسبة الأسمنت أو تغير في نسبة الألياف في الخلطة الخرسانية، وانطلاقاً من هذه التجارب الشاملة تم تحليل النتائج ووضع نماذج رياضية تسمح بدرجة عالية باستقراء سلوك الخرسانة المعززة بالألياف الفولاذية الإبرية تحت تأثير مختلف حقول الإجهادات الممكنة. لتحديد دور الألياف الفولاذية وكمية الإسمنت المستخدم في الخلطة الخرسانية تمت مقارنة نتائج الاختبار على الخرسانة المعززة بالألياف الفولاذية مع نتائج الاختبار على خلطات مرجعية دون الياف فولاذية. أما عملية النمذجة الرياضية ومن أجل الوصول إلى علاقات رياضية عامة فاقتضت البحث عن عوامل ومتحولات نسبية تسمح بالانتقال من الحالة الخاصة إلى الحالة العامة، مما يسمح بكتابة صيغ رياضية عامة قابلة للتطبيق مهما كانت كمية الإسمنت أو نسبة الألياف الفولاذية المستخدمة.

1- الأعمال المخبرية

تم تحضير عينات مكعبية (15×15×15 سم) لثلاث خلطات معززة بنسب مختلفة من الألياف الفولاذية الإبرية (المستخرجة من الإطارات المستهلكة للسيارات recycled steel fiber). في البداية تم تصميم العينة المرجعية لكل

عيار إسمنت وأضيفت الألياف الفولاذية بنسب حجمية متدرجة 0.5-1-1.5% ما يعادل وزنا 39-79-118 م/كغ. أما الحجم الإضافي الذي ستشغله الألياف فقد تم حسمه من حجوم الحصويات بنسبة مساهمة كل منها. في الجداول الآتية مكونات الخلطات الخرسانية بالألياف والخلطات المرجعية.



الشكل 1: صورة تبين الألياف المستخرجة من الإطارات المستهلكة للسيارات والمستخدمة في الاختبارات

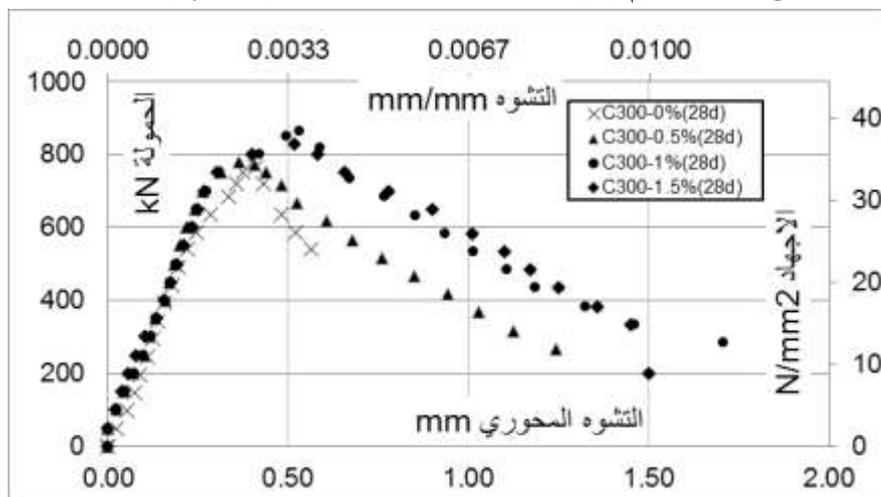
تمت الاختبارات على خلطات من الخرسانة بعيارات إسمنت 300-350-400 م/كغ، معززة بألياف فولاذية بقطر 0.8 مم بثلاث نسب حجمية (1.5% - 1% - 0.5%) بأطوال 30-40-60 مم. أجريت الاختبارات في مخابر كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق. ولتحقيق هذا الغرض تم مقارنة النتائج بنتائج خلطات مرجعية دون الياف فولاذية. ويبين الجدول (1) مكونات إحدى الخلطات وهي الخلطة عيار إسمنت 350.

الجدول 1: مكونات الخلطة عيار إسمنت 350

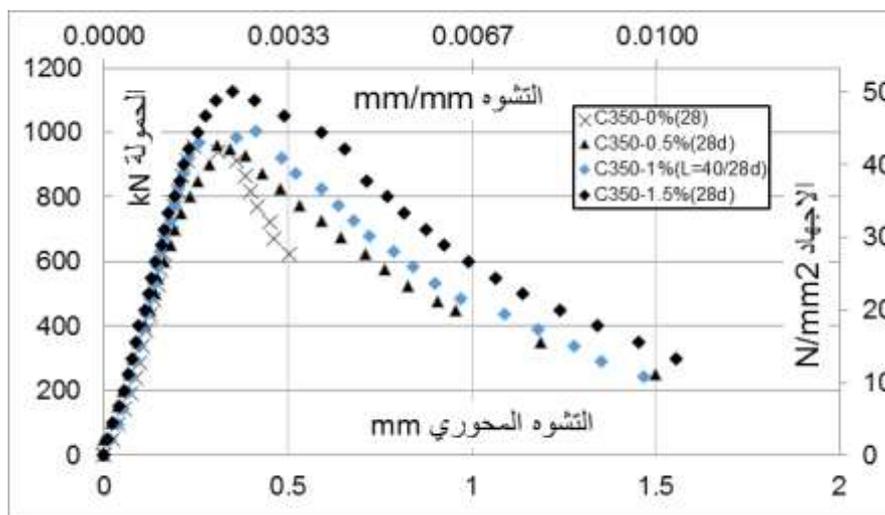
C350				نسبة الألياف %			
				0	0.5	1	1.5
				المكونات لكل م ³			
المواد	الوزن النوعي	نسب الحصويات %	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
الإسمنت	3.15		350	350	350	350	350
الماء	1		180	180	180	180	180
حصويات خشنة	Φmax=19mm	2.78	29.5	557	552	548	544
	Φmax=9.5mm	2.78	18.0	341	338	336	334
حصويات ناعمة.	رمل مكسر	2.73	37.4	706	701	696	691
	رمل طبيعي	2.62	15.1	285	283	281	279
الألياف	7.85		0	39	79	118	
الملدن	1.2		5	5	5	5	

2- قاعدة البيانات ونتائج الإختبار

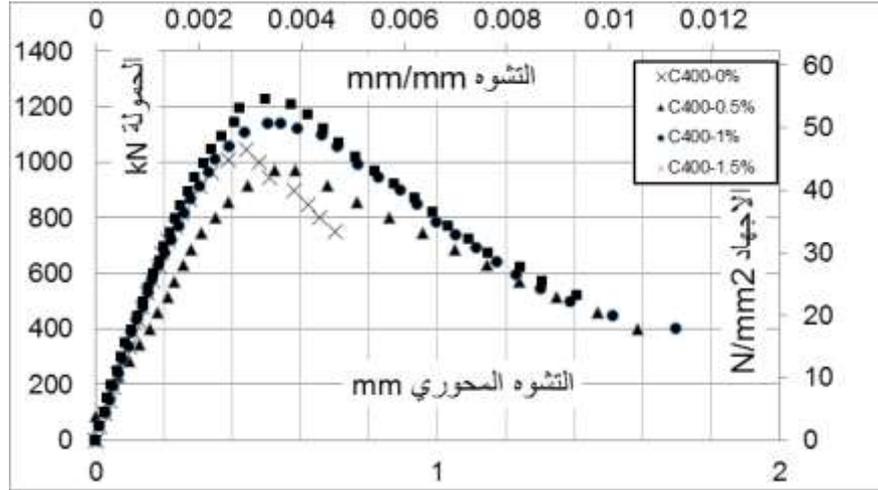
استخدمت نتائج اختبار الخرسانة بمكوناتها المختلفة لتشكيل قاعدة بيانات شاملة لتنفيذ عمليات التحليل الميكانيكي والرياضي. في الأشكال 2 و3 و4 تظهر شكل سلوك الخرسانة (العلاقة بين الاجهاد والتشوه) الناتجة عن كسر العينات المكعبة على عمر 28 يوم ومن أجل نسب مختلفة للألياف الفولاذية الإبرية.



الشكل 2: منحنى الاجهاد - التشوه لعينات خرسانة عيار اسمنت 300 بنسب ألياف مختلفة



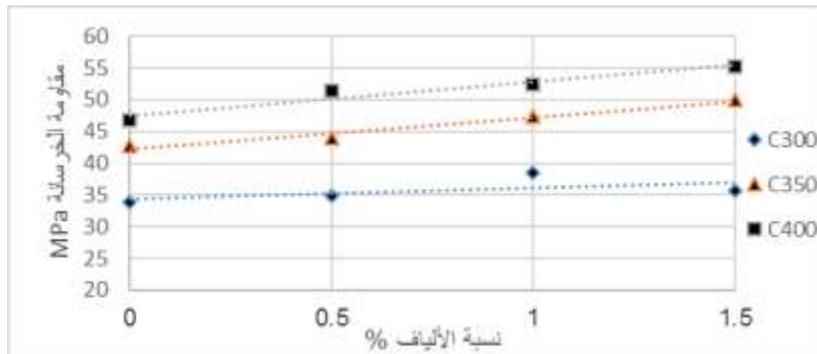
الشكل 3: منحنى الاجهاد - التشوه لعينات عيار اسمنت 350 بنسب ألياف مختلفة



الشكل 4: منحنى الاجهاد -التشوه لعينات عيار اسمنت 400 بنسب ألياف مختلفة

يظهر في هذه الأشكال تأثير الألياف الإبرية (المستخرجة من إطارات السيارات المستهلكة) على سلوك الخرسانة من خلال مؤشرين أساسيين وهما قوة الكسر والتشوه المحوري للعينة، كما يظهر واضحاً التحسن الحاصل على مطاوعة المادة وزيادة قدرتها على امتصاص الطاقة.

من النتائج الموضحة بالجدول (2) والشكل (5) من الممكن ملاحظة التحسن في مقاومة الخرسانة على الضغط المحوري تبعاً لكمية الإسمنت ونسبة الفولاذ المستخدم. يفسر Colombo, 2006 [1] هذا التحسن بتشكيل أعمدة ضمن العينة المعرضة للضغط المحوري كنتيجة لوجود الألياف الفولاذية بحيث تنهار بشكل مفاجئ عند وصول هذه الأعمدة إلى قدرة تحملها الأعظمي بشكل مشابه لظاهرة لعمل الأعمدة المعرضة لتحميل محوري. هذا التفسير ينطلق من فكرة عمل الألياف على تشبيك البنية الحبيبة بالشكل الذي يساعدها على العمل مع بعضها بشكل متكامل أكثر من حالة الخرسانة العادية. كما لوحظ انخفاض في قيمة المقاومة على الضغط لعينات عيار اسمنت 300كغ/م³ ونسبة ألياف 1.5% مقارنة مع نسب ألياف 1% ويمكن تفسير ذلك بزيادة السطح النوعي للألياف مع ثبات عيار الإسمنت لذلك من المستحسن استخدام عيار إسمنت أعلى من أجل نسب ألياف مرتفعة (أكبر من 1.5%).



الشكل 5: التمثيل البياني لمقاومة الخرسانة المعززة بالألياف الفولاذية الإبرية مع نسبة الالياف

الجدول 2: مقاومة الخرسانة على الكسر وفقاً لكمية الإسمنت ونسبة الألياف في الخلطة

C300		
النسبة المئوية للزيادة	المقاومة المكعبية	نسبة الألياف
%	MPa	%
100%	33.96	0%
103%	34.96	0.50%
113%	38.44	1%
105%	35.70	1.50%
C350		
النسبة المئوية للزيادة	المقاومة المكعبية	نسبة الألياف
%	MPa	%
1	42.73	0%
1.03	44.00	0.50%
1.11	47.26	1%
1.17	50.00	1.50%
C400		
النسبة المئوية للزيادة	المقاومة المكعبية	نسبة الألياف
%	MPa	%
1	46.65	0%
1.10	51.44	0.50%
1.12	52.42	1%
1.18	55.22	1.50%

3- النمذجة الرياضية لمقاومة الخرسانة

6-1 طول الألياف ومقاومة الخرسانة على الضغط المحوري

يتضح من خلال نتائج الكسر أن مقاومة الخرسانة على الضغط مرتبطة بعيار الإسمنت ونسبة الألياف في الخلطة، ووفق هذه المعطيات تم البحث عن العلاقة الرياضية الأكثر تمثيلاً للعلاقة بين مقاومة الخرسانة (المعززة بالألياف) وعيار الإسمنت ، باستخدام برنامج معالجة المنحنيات 1.4 curve expert، والشكل 6 يوضح الحلول الرياضية الأكثر ترجيحاً مع عامل الترابط R.

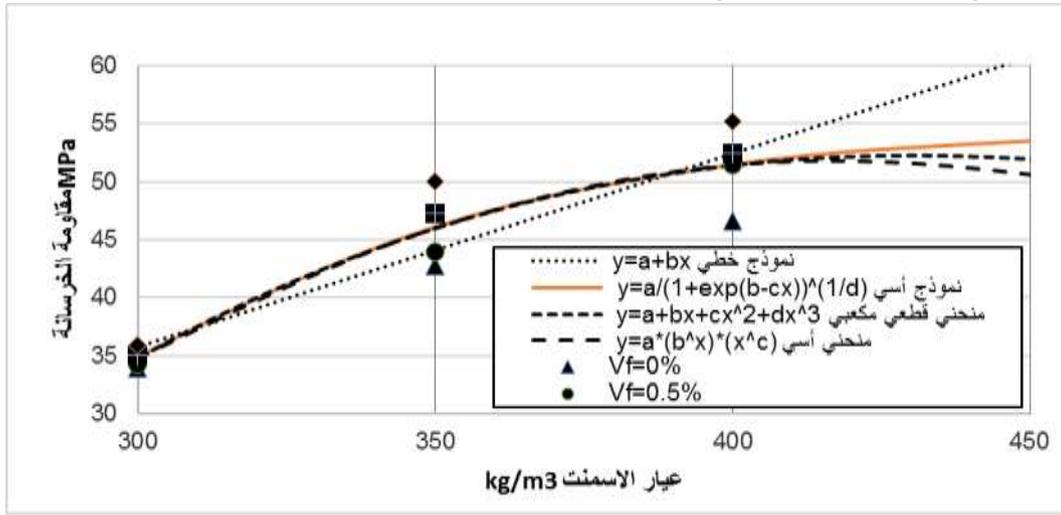
من خلال الشكل الرياضي التمثيلي (الشكل 6) يتضح أن النموذج الآسي المعرف في المعادلة (1a) والمعروف باسم Richards Model يمثل السلوك الأكثر واقعية للخرسانة المعززة بالألياف الفولاذية الإبرية هو الأقرب إلى التعبير عن العلاقة بين مقاومة الخرسانة وعيار الإسمنت من أجل نسب ألياف مختلفة، حيث تتزايد المقاومة بشكل كبير مع الزيادة في عيار الإسمنت حتى 450 كغ/م³ ومن أجل مقاومة لا تتجاوز مقاومته الاسمية

القوى ، بينما تظهر النماذج الأخرى جنوباً نحو انخفاض المقاومة بعد كمية عيار محدد وهذا لا يتفق مع الواقع في حين يظهر النموذج الخطي تزايداً لا نهائياً، مثلاً صيغة كثير الحدود من الدرجة الثالثة وصيغة المنحني الأسّي من الشكل $y=a*(b^x)*(x^c)$ والمعروف باسم Hoerl Model تظهران جنوباً نحو انخفاض في المقاومة من أجل كميات إسمنت أكبر من 400 كغ/م³ وهذا يتعارض مع العلاقة بين كمية الإسمنت ومقاومة الخرسانة..

$$(1a)y = \frac{a}{(1+e^{(b-cx)})^{\frac{1}{d}}}$$

حيث y تمثل المقاومة و x عيار الاسمنت (كغ/م³). a, b, c, d ثوابت المعادلة وتعويض قيم تأخذ الصيغة الشكل الآتي: (1b)

$$(1b)y = \frac{54.577}{(1+e^{(6.118-0.022x)})^{\frac{1}{0.992}}}$$



الشكل 6: نماذج رياضية للعلاقة بين مقاومة الخرسانة وعيار الإسمنت من أجل نسب ألياف مختلفة

2-6 المطاوعة والتشوهات المحورية

من نتائج الاختبار (الأشكال 2، 3، 4) يتضح أن مقدار التشوهات المحورية للعينات مرتبط بعيار الإسمنت ونسبة الألياف الفولاذية في الخلطة الخرسانية. يعبر عن المساحة الكلية تحت منحنى التشوه الاجهاد بالمتانة Toughness وهي مؤشر على دور الالياف المعدنية على تحسن مطاوعة الخرسانة، كما يعبر هذا المؤشر عن مقدار الطاقة (المبددة) اللازمة لحدوث تشوه الحجم قبل انهيار العينة الخرسانية.

للتعبير عن هذه المساهمة في زيادة الطاقة اللازمة مقارنة بالخرسانة غير المعززة بالألياف استخدم Otter and Naaman, 1998[2] مفهوم قرينة المتانة Toughness Index وهي نسبة المساحة تحت منحنى التشوه-الإجهاد لعينة بألياف الى المساحة لعينة مرجعية دون ألياف.

وفق هذا المفهوم، نجد في البحوث المتوفرة العديد من الطرق لحساب المتانة على الضغط، فقد استخدم Hsu and Hsu 1994[3] مؤشر المتانة النسبية وهي نسبة المساحة تحت منحنى التشوه-الإجهاد لعينة بألياف عند تشوه مقداره 0.012 الى المساحة لعينة مرجعية بدون ألياف عند التشوه نفسه. أما Taerwe 1992[4] ومن أجل ألياف فولاذية معكوفة من النهايتين فقد توقف بحدود المتانة عن التشوه 0.007. أما Bayasi and Soroushian, 1989 [5] فقد أجريا تجارب على خرسانة بألياف فولاذية مع إضافة مواد بوزلانية، وحسب المتانة من أجل تشوه يساوي 5.5 ضعفاً من التشوه الموافق

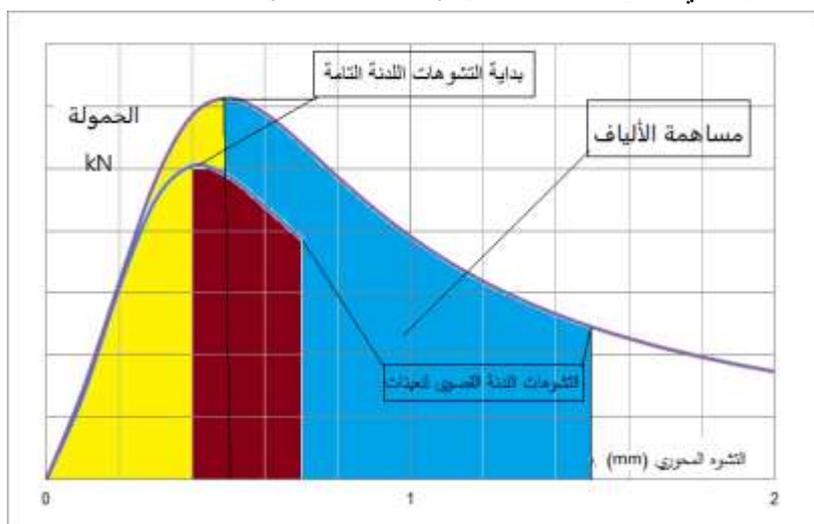
للإجهاد الأعظمي. أما [6] Mansur et al, 1999 فقد استخدم خرسانة بألياف فولاذية عالية المقاومة معكوفة النهايتين بطول 30مم وقطر 0.5 مم وحسب قرينة المتانة من أجل تشوه مقداره 3 ضعفاً للتشوه الموافق للإجهاد الأعظمي، كما حسب [7] Tjiptobroto and Hansen 1993 قرينة المتانة لتشوه أعظمي مقداره 0.006 الى المساحة عينة مرجعية بدون ألياف عند نفس التشوه، كما اعتمد [8] Bhargava et al, 2006 في الحساب تشوه يصل الى 0.015، بينما استخدم [9] Marara et al, 2011 في الحساب التشوه 0.033.

3-6 المتانة (Toughness (T

رياضياً، يعبر عن المتانة من منحنى الإجهاد التشوه أو من منحنى القوة - الانتقال، بالعلاقة

$$(2) T = \frac{1}{V} \int P. d\delta = \int \sigma. d\varepsilon$$

حيث σ الاجهاد (نيوتن/مم²)، ε التشوه النسبي (الانفعال مم/م)، P القوة المحورية (نيوتن)، δ التشوه المحوري في العينة (مم)، V حجم العينة (مم³). يحسب التكامل بين حدي التشوهات المحورية اللدنة: التشوهات المقابلة للمقاومة العظمى (الذروة بداية ظهور التشوهات اللدنة التامة) وحد انهيار إعتباري يقابل تشوه محوري مقداره 1.5 مم (تشوه نسبي 1%). أما حدود التشوهات اللدنة القصوى للعينات المرجعية (بدون ألياف) فكانت موافقة لتشوه محوري 0.7 مم وهو التشوه الذي أمكن تسجيله قبل انهيار العينات المختبرة بشكل كامل.



الشكل 7: شكل توضيحي لطريقة حساب المتانة على الضغط

تتعلق المتانة بعوامل عدة مثل عيار الإسمنت ونسبة الألياف ومعامل النحافة (طول الليف/القطر) (الشكل 7) وتكتب المتانة كتابع لهذه المتحولات:

$$(3) T = f(C, V_f, L_f, d_f)$$

C عيار الاسمنت، V_f نسبة الألياف، L_f طول الليف، d_f القطر الأسمي للليف.

ولاستقراء قيمة المتانة نحتاج لعلاقة معقدة متعددة الحدود ترتبط بجميع العوامل المؤثرة بخصائص الخرسانة

المعززة بالألياف المعدنية لذلك سندرس تأثير هذه العوامل على المتانة.

حسبت المساحة تحت منحنى القوة - الانتقال عددياً بتقسيمها الى أشباه منحرفة ثم جمعت المساحات الجزئية

تراكمياً لكل خلطة وكل نسبة ألياف (الجدول 3).

الجدول 3: المتانة / عينة مكعبية

المتانة / عينة مكعبية N.mm				
عيار الاسمنت	نسبة الألياف حجماً %			
	0	0.5	1	1.5
300	165.6535	411.80	489.33	604.00
350	197.9794	576.87	623.61	669.50
400	248	638.33	734.80	747.30

4-6 المتانة الحجمية (Tv) volumetric Toughness

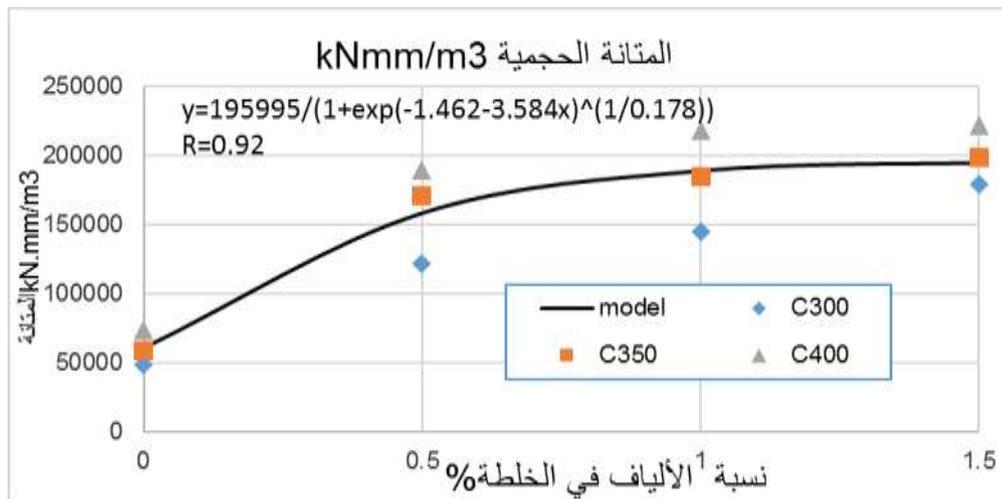
يفضل التعبير عن المتانة بالنسبة إلى وحدة الحجم من الخرسانة وسنسميها "المتانة الحجمية" وتساوي متانة العينة /حجم العينة الجدول (4) ونحصل على معادلتها (4) بإدخال معطيات الجدول 3 في برنامج معالجة المنحنيات.

$$(4) T_v = \frac{195995}{\left[1 + e^{(-1.462 - 3.584V_f)}\right]^{0.178}}$$

حيث Tv المتانة الحجمية kN.mm/m³، Vf نسبة الألياف (%)

الجدول 4: المتانة الحجمية

المتانة الحجمية kN.mm/m ³				
عيار الاسمنت	نسبة الألياف حجماً %			
	0	0.5	1	1.5
C300	49082.52	122013.3	144987	178961.5
C350	58660.56	170924.3	184772.7	198371.6
C400	73566.13	189135.4	217717.5	221421



الشكل 8: المتانة الحجمية مع نسبة الألياف

5-6 المتانة العيارية (Tc) Toughness related cement content

وللتبسيط يمكن نسبة المتانة الحجمية الى عيار الإسمنت فنحصل على "المتانة العيارية" أي المتانة بالنسبة إلى 1 كغ إسمنت. وبشكل مماثل نحصل على معادلة المتانة العيارية (المعادلة 5).

وتصبح معادلة المتانة العيارية من الشكل

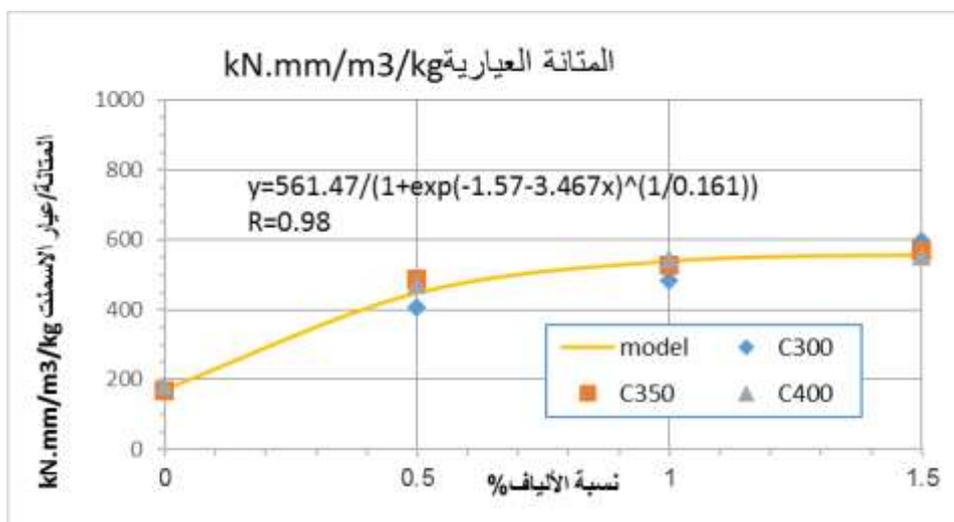
$$T_c = \frac{T_v}{C} \quad (5a)$$

$$(5b) T_c = \frac{561.47}{\left[1 + e^{(-1.57 - 3.467V_f)}\right]^{0.16}}$$

حيث Tc المتانة العيارية، Tv المتانة الحجمية ، Vf نسبة الألياف (%)

الجدول 5: المتانة العيارية

المتانة العيارية Tc				
	نسبة الألياف حجما %			
عيار الاسمنت	0	0.5	1	1.5
C300	163.6084	406.7112	483.2901	596.5384
C350	167.6016	488.3552	527.9221	566.776
C400	183.9153	472.8385	544.2936	553.5524



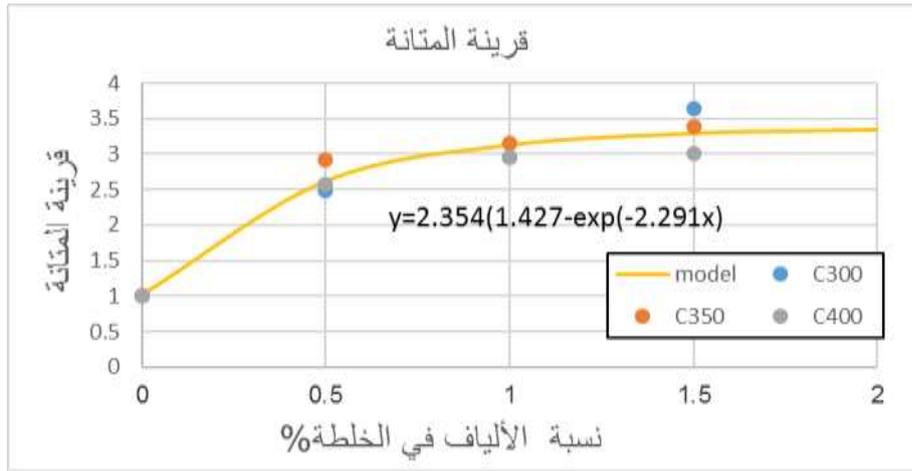
الشكل 9: المتانة العيارية

6-6 قرينة المتانة Toughness Index TI

للتعبير عن تحسن مطاوعة المادة يستخدم مؤشر قرينة المتانة المكعبية وهو يعادل الزيادة في مساحة المطاوعة في منحنى القوة - الانتقال نسبة للمساحة للعينة المرجعية وذلك حتى تشوه مقداره 1.5 مم للعينات المسلحة بالألياف وتشوه 0.7 مم للعينات المرجعية كما بيّنا سابقاً.

الجدول 6: قرينة المتانة Toughness Index

قرينة المتانة				
	نسبة الالياف حجما %			
عيار الاسمنت	0	0.5	1	1.5
C300	1	2.485882	2.953945	3.646135
C350	1	2.913786	3.149863	3.381686
C400	1	2.570958	2.95948	3.009822



الشكل 10: قرينة المتانة مع نسبة الالياف

من خلال العلاقة (6) التي تربط بين قرينة المتانة ونسبة الألياف يمكن تقدير تطور قيمة المتانة بالنسبة إلى

متانة العينة المرجعية وتساوي T_I أو قرينة المتانة Toughness Index

$$T_I = \frac{T_c^{V_f}}{T_c^0} \quad (6a)$$

$$T_I = 2.354(1.427 - e^{-2.291V_f}) \quad (6b)$$

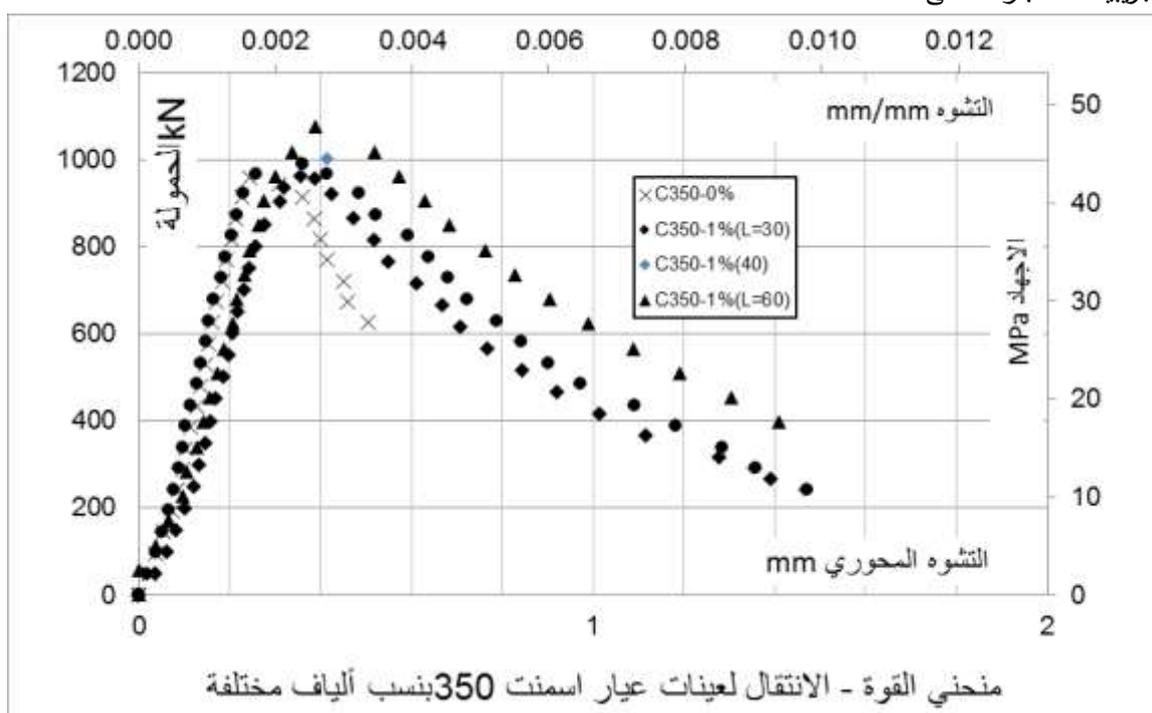
حيث T_c^0 المتانة العيارية المرجعية و $T_c^{V_f}$ المتانة العيارية في حال استخدام نسبة ألياف V_f

من الشكل 10 يمكن أن نلاحظ أن قرينة المتانة تتزايد بشكل ملحوظ من أجل نسبة الياف حتى 0.5% يفسر

بتطور في خصائص الخلطة الخرسانية، ثم تنحى نحو تزايد ثابت متناسب مع زيادة نسبة الألياف.

7-6 تأثير نحافة الأسلاك الفولاذية (aspect ratio)

في الفقرات السابقة تمت دراسة تأثير إضافة الألياف على المقاومة وعلى المتانة باستخدام ألياف بطول 40 مم لها معامل نحافة يساوي 50. لدراسة تأثير تغير معامل النحافة تم تحضير عينات مكعبية عيار إسمنت 350 كغ/م³ ونسب ألياف 1% بأطوال ألياف 30-60 مم (حيث معامل نحافتها 37.5-75 على الترتيب). اختبرت العينات على الضغط المحوري وتمت مقارنتها مع العينات السابقة حيث أطوال الألياف المستخدمة 40 مم ويظهر الشكل 11 النتائج التجريبية للاختبارات على الضغط.



الشكل 11: منحنى القوة - الانتقال لعينات عيار 350 بأطوال ألياف مختلفة

لتعميم العلاقات السابقة ندخل تأثير معامل النحافة للألياف من خلال تصحيح النتائج التي يتم استقراؤها لمقاومة الخرسانة بمعامل تصحيح α وبشكل مماثل تصحح النتائج التي يتم استقراؤها لقرينة المتانة بمعامل تصحيح β . يحسب معاملي التصحيح كما يأتي:

نعتبر الخلطة عيار إسمنت 350 ونسبة الألياف 1% ومعامل نحافة 50 هي الخلطة المرجعية عند حساب معاملي التصحيح.

نحسب معاملي التصحيح لمقاومة الخرسانة α كنسبة بين مقاومة العينات إلى مقاومة العينة المرجعية (الجدول 7).

نحسب معاملي التصحيح لقرينة المتانة β كنسبة إلى متانة العينة المرجعية (الجدول 8).

نوجد العلاقة بين معاملي التصحيح ومعامل النحافة لليف (المعادلتين 8 و 9).

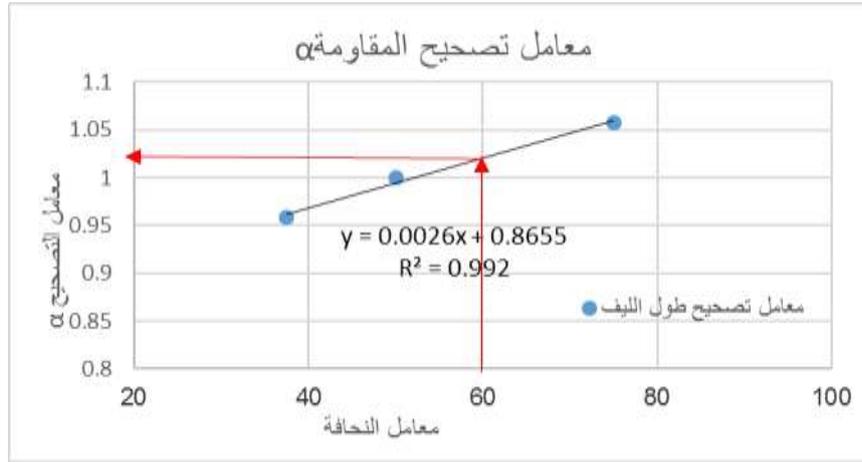
$$(7) \alpha = 0.0026.X + 0.865$$

$$(8) \beta = -0.0006.X^2 + 0.0681.X - 1.01$$

حيث تمثل X معامل النحافة

الجدول 7: معامل تصحيح المقاومة α بسبب معامل النحافة للليف

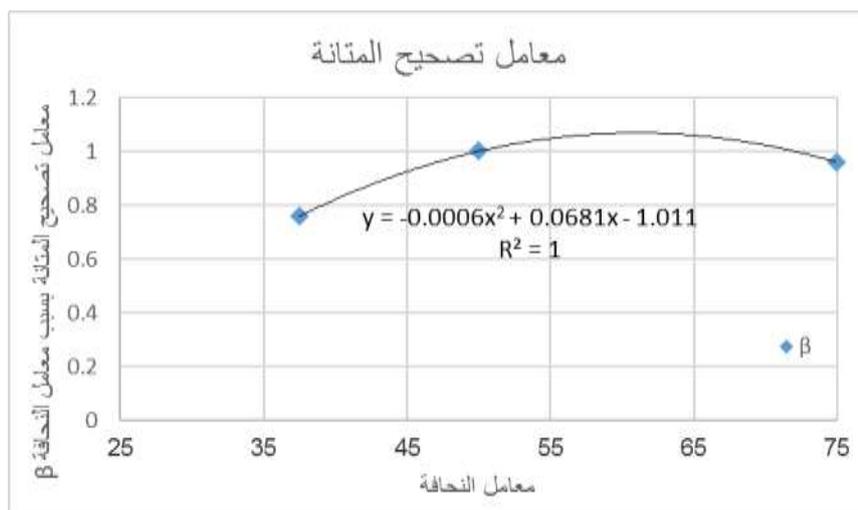
معامل التصحيح α	معامل النحافة للليف	طول الليف	المقاومة
0.9042	0	0	42.73
0.9592	37.5	30	45.33
1	50	40	47.26
1.058	75	60	50.00



الشكل 12: معامل التصحيح α

الجدول 8: معامل تصحيح قرينة المتانة β بسبب نحافة الليف

معامل التصحيح β	معامل النحافة	المتانة عينة مكعبية kN.mm	
		نسبة الاليف حجما %	
طول الليف		0%	1%
0.7589	37.5	198	473
1	50	198	624
0.9588	75	198	598



الشكل 13: معامل التصحيح β

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم التوصل الى نماذج رياضية لتوصيف مقاومة الخرسانة المعززة بالألياف الفولاذية المستخرجة من الإطارات المطاطية المستهلكة للسيارات.
- صيغت النماذج الرياضية المقترحة بقيم لا بعدية مستقلة عن عيار الإسمنت ونسبة الألياف ومعامل النحافة لليف مما يسهل استخدامها كعلاقات عامة.
- تفيد النماذج الرياضية المقترحة في التنبؤ بالزيادة في مقاومة الخرسانة وقرينة المتانة عند إضافة هذه الألياف انطلاقاً من عيار الإسمنت ونسبة الألياف ومعامل النحافة.
- انطلاقاً من هذه العلاقات البيئية يمكن أن نستنتج قيمة متانة خلطة بيتونية جافة معززة بألياف معدنية إبرية بالتتابع العكسي للعلاقات السابقة.
- سمح تحليل مؤشر التشوه بالوصول الى نتيجة مفادها أن استخدام نسبة ألياف أعلى من 1% لا يؤدي الى زيادة ملحوظة في متانة الخرسانة. لذلك نوصي استخدام نسبة ألياف حجمية تساوي 1% أي ما يعادل وزني 80 كغ/م³.

المراجع:

- 1- COLOMBO, M. FRC Bending Behaviour: A Damage Model for High Temperatures. PhD thesis, Politecnico di Milano, 2006.
- 2- Otter DE and Naaman AE. Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Under Cyclic Loading. ACI Materials Journal. 1988; 85(4):254-261.
- 3- Hsu LS and Hsu C-TT. Stress-Strain Behavior of Steel-Fiber High-Strength Concrete Under Compression. ACI Materials Journal. 1994; 91(4):448-457.
- 4- Taerwe LR. Influence of Steel Fibers on Strain-Softening of High-Strength Concrete. ACI Materials Journal. 1992; 89(1):54-60.
- 5- Bayasi Z and Soroushian P. Optimum Use of Pozzolanic Materials in Steel Fiber Reinforced Concrete. Transportation Research Record. 1989; 1226:25-30.

- 6- Mansur MA, Chin MS and Wee TH. Stress-Strain Relationship of High-Strength Fiber Reinforced Concrete in Compression. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. 1999; 11(1):21-29.
- 7- Tjiptobroto P and Hansen W. Tensile Strain Hardening and Multiple Cracking in High Performance Cement-Based Composites Containing Discontinuous Fibers. ACI Materials Journal. 1993; 90(1):16-25.
- 8- Bhargava P, Sharma UK and Kaushik SK. Compressive Stress-Strain Behavior of Small Scale Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete Cylinders. Journal of Advanced Concrete Technology. 2006; 4(1):109-121.
- 9- Khaled Marara; Özgür Erenb; İbrahim Yitmena. Compression specific toughness of normal strength steel fiber reinforced concrete (NSSFRC) and high strength steel fiber reinforced concrete (HSSFRC).2011