

الخصائص الميكانيكية للخرسانة عالية المقاومة المسلحة بالالياف الفولاذية

حسن شمس الدين

طالب ماجستير

جامعة الموصل / كلية الهندسة / قسم الهندسة المدنية

د. سالم طيب يوسف

استاذ مساعد

الخلاصة

في هذا البحث تم عمل خمس مزجات خرسانية و اعداد نماذج خرسانية لفحوصات الانضغاط و الشد الانشطاري و معامل المرونة و منحنى الاجهاد و الانفعال و الانتشاء، تم استخدام خمس نسب من غبار السليكا و ثلاث نسب من الالياف الفولاذية. إن أعلى نسبة زيادة لمقاومة الانضغاط كانت (32%) نسبة الى المزجة المرجعية و بعمر تسعين يوماً عند نسبة غبار السليكا 5% و لنسبة الياف فولاذية 0.5%، بالنسبة لمقاومة الشد الانشطاري اعلى نسبة زيادة هي (42%)، في حين أن اعلى نسبة زيادة لمقاومة الانتشاء بلغت (33%)، كما أن أعلى نسبة زيادة لمعامل المرونة كانت (27%). و بناء على نتائج الدراسة تم التوصل الى ان اضافة الالياف الفولاذية تؤدي الى زيادة في مقاومة انضغاط الخرسانة و مقاومة الشد الانشطاري و مقاومة الانتشاء و معامل المرونة و زيادة ميل منحنى الاجهاد و الانفعال و استمرار المنحنى لمسافة أطول، تسبب اضافة غبار السليكا الى زيادة ملحوظة في مقاومة انضغاط الخرسانة و مقاومة الشد الانشطاري و معامل المرونة و زيادة ميل منحنى الاجهاد و الانفعال، بينما تقلل من مقاومة الانتشاء.

الكلمات الدالة: خرسانة عالية المقاومة، الالياف الفولاذية، غبار السليكا، الخصائص الميكانيكية

Mechanical Properties of High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete

Dr. salim T. Yousif

Assistant Professor

University of Mosul/College of Engineering

hisaan Shams-aldeen

MSc Student

Abstract

In this research, five concrete mixes were prepared, made samples for compressive, Splitting, bending and modulus of elasticity test have been use five of silica fume percentages and three of steel fiber percentages. According to results of this study, addition of steel fiber cause increase in compressive strength, splitting strength, bending strength, modulus of elasticity, and increase the angle of stress-strain curve. Addition of silica fume cause increase in compressive strength, splitting strength, modulus of elasticity, increase the angle of stress-strain curve while cause decreasing in bending strength. The higher compressive strength percentage was (32%) as compared to reference sample prepared at ninety days with silica fume percentage (5%) and steel fiber (0.5%), The higher percentage for splitting strength was (42%) while the highest percentage for modulus of rupture (33%), The highest ratio for modulus of elasticity (27%).

Keywords: High strength concrete, Steel fibers, Silica fume, mechanical properties

1- المقدمة

نتيجة لتزايد المتطلبات التكنولوجية و المعمارية فقد وجدت أنواع جديدة من الخرسانة من أهمها الخرسانة عالية المقاومة، ان الخرسانة عالية المقاومة تعطي امكانية الحصول على مقاومات ضغط مرتفعة نسبيا و تسمح للمصمم بإنشاء أبنية أكثر ارتفاعا و بلاطات أقل سمكا و أعمدة أصغر مقطعا مما يعطي جمالية أكثر لهذه التصاميم، و باستعمال الخرسانة عالية المقاومة يمكن فك الشدات بشكل أسرع، و تقليل كمية حديد التسليح في المباني العالية مما يخفف من الحمل الميت فيها. يمكن أن نحصل على الخرسانة عالية المقاومة باستخدام نفس المواد الداخلة في تركيب الخرسانة الاعتيادية مع استعمال التقنيات الحديثة بهدف الحصول على مادة ذات عمر أطول و مقاومة أعلى، و على أي حال فان هذه الأيام تشهد بداية ثورة ثانية في تكنولوجيا الخرسانة حيث أمكن التغلب على التناقض الناشئ بين المقاومة العالية و القابلية المنخفضة للتشغيل وذلك بإنتاج و استخدام الملدنات و التي تسمح باستخدام نسبة ماء قليلة، بعض الاضافات المنخفضة للماء جدا قد تخفف نسبة الماء الى 0.25 من وزن الاسمنت و في الوقت نفسه تعطي قابلية عالية للتشغيل، و بالرغم من أن هذه الخرسانة العالية المقاومة لم تأخذ طريقها الى الواقع العملي في بلادنا حتى الان الا انها أصبحت شائعة الاستعمال في دول أوروبا و أمريكا و اليابان و حتى في بعض دول العالم الثالث مثل ماليزيا و التي تم فيها انشاء أعلى المباني الادارية في العالم.

تعريف الخرسانة عالية المقاومة في تطور مستمر ففي عام 1950 كان تعريف الخرسانة عالية المقاومة بأنها تلك التي تمتلك مقاومة انضغاط (34 MPa) او أكثر، إلا أن في العقود الأخيرة حصل تطور في المواد و طرق الإنتاج و الفحص مما دعا إلى تغيير تعريف الخرسانة عالية المقاومة حيث تعرف الان بالخرسانة التي تمتلك مقاومة انضغاط (55 MPa) أو أكثر [1].

أجرى الباحث (Samman) وآخرون [2] في عام (1999) دراسة عن الخصائص الميكانيكية للخرسانة الاعتيادية و عالية المقاومة المسلحة بالألياف فولاذية بنسب حجمية تتراوح بين (0-1.5) % و غبار سليكا تتراوح بين (0-10) %، إستخدم الباحثون اسطوانة قياس (300mm×150mm) و اسطوانة قياس (200mm×100mm) و مكعب قياس (150mm) وفق المواصفة (ASTM C31 , C39 , C192). باضافة الياف فولاذية ذا نهايات منحنية بنسبة 1.5% من حجم الخرسانة ازدادت مقاومة الانضغاط بين (12-50) % بالمقارنة مع الخرسانة غير المسلحة. استنتج الباحثون علاقات تربط مقاومة الانضغاط للأسطوانة و مقاومة الانضغاط للمكعب و مقاومة الانضغاط لمكعب قياس (150mm) و مقاومة الانضغاط لمكعب قياس (100mm). و بزيادة محتوى الألياف من (0) % إلى (1.5) % يزيد مقاومة الشد الانشطاري بحدود 53% إلى 94%

أجرى الباحث (صالح) و آخرون [3] في عام (2005) دراسة عن تأثير محتوى الألياف الفولاذية و كذلك التأثير المشترك لكل من رماد قشور الرز و الملدن المقلل للماء بدرجة متفوقة على الخواص الميكانيكية للمزجة الخرسانية المنتجة. النتائج العملية بينت أن استخدام الألياف الفولاذية في الخرسانة عالية الاداء يقود الى تحسين مميز للخواص الميكانيكية للخرسانة

قام الباحث (Katkhuda) و آخرون [4] عام (2009) بدراسة عملية حول تأثير غبار السليكا على الخصائص الميكانيكية للخرسانة عالية المقاومة خفيفة الوزن حيث تم استخدام خمس نسب من غبار السليكا بمقدار (0%، 5%، 10%، 15%، 20%، 25%) من وزن الاسمنت بدلا عن الاسمنت و نسبة ماء الى مواد اسمنتية تتراوح بين (0.26-0.42). كل المزجات فحصت بعمر ثمان و عشرين يوماً. الدراسة أظهرت تحسن مقاومة الانضغاط بزيادة غبار السليكا و لكن النسبة الأمثل للاستبدال ليست ثابتة وذلك لأعتمادها على نسبة الماء الى مواد اسمنتية، اما النسبة الأمثل لغبار السليكا بالنسبة لمقاومة الشد الانشطاري هي 15% عند نسبة ماء الى مواد اسمنتية 0.26 و 0.3 و تليها نسبة 20% عند نسبة ماء الى مواد اسمنتية 0.34 و 0.38 و 0.42.

وقد عمل الباحثون على تكوين علاقات تجريبية بطرق إحصائية بين مقاومة الانثناء للخرسانة عالية المقاومة خفيفة الوزن و مقاومة الانضغاط للخرسانة عالية المقاومة خفيفة الوزن و بنسب مختلفة من غبار السليكا، النسبة الأمثل لغبار السليكا بالنسبة لمقاومة الانثناء تتراوح بين (15-25) % معتمداً على نسبة ماء الى مواد اسمنتية.

قام الباحثان (sarsam & Zaid) [5] عام (2010) بدراسة عملية حول تأثير أنواع مختلفة من الألياف الفولاذية و بنسب حجمية مختلفة تتراوح بين صفر إلى 2% على الخرسانة، تراوحت مقاومة الخرسانة من 41 MPa إلى 115 MPa، و تبين أن اضافة الألياف الفولاذية مستقيمة بنسبة 1.5% من حجم الخرسانة يزيد مقاومة الانضغاط بمقدار 6% و زيادة بمقدار 17.5% بالنسبة للإضافة 1.5% ألياف فولاذية منحنية النهايات، و عموماً بوجود الألياف تختلف خواص الخرسانة بشكل واضح عن خواص الخرسانة غير المسلحة.

عند اضافة الالياف الفولاذية المستقيمة بنسبة 1.5% من حجم الخرسانة ازدادت مقاومة الانثناء بمقدار 24.5% و بمقدار 77% عند اضافة الالياف الفولاذية ذات نهايات منحنية بنسبة 1.5% من حجم الخرسانة و استخدم الباحثان رافدة (prism) بأبعاد (400mm×100mm×100mm) وفق المواصفة ASTM C78 .

كما تمت دراسة تأثير الألياف الفولاذية على مقاومة الشد الانشطاري، حيث عند اضافة الالياف الفولاذية المستقيمة بنسبة 1.5% من حجم الخرسانة ازدادت مقاومة الشد الانشطاري بمقدار 32% و ازدادت بمقدار 99% بإضافة الياف فولاذية بنهايات منحنية. استخدم الباحثان ستة نماذج اثنان منها اسطوانة قياس (300mm×150mm) و البقية اسطوانة قياس (200mm×100mm) وفق المواصفة (ASTM C496).

2- المواد و طرق العمل

تم استخدام المواد المتوفرة محليا و المتمثلة بالماء، الركام الناعم، الركام الخشن و الاسمنت و المضافات و ذلك بعد مفايرنتها مع المواصفات و بالشكل التالي:

1-2: الاسمنت: استخدم في هذا البحث سمنت ماردين تركي المنشأ متوفر محليا. يبين الجدول (1) نتائج التحليل الكيميائي للإسمنت، أما الجدول (2) فيبين الخصائص الفيزيائية للإسمنت و تم الفحص وفق المواصفة العراقية (IQS, No 5, 1984).

2-2: الركام الناعم: استخدم الركام الناعم المتوفر في منطقة كنهش القريبة من مدينة الموصل و بمعامل نعومة يبلغ (3.0)، تم غسل الركام الناعم للتخلص من المواد الطينية و تم ايجاد الوزن النوعي للركام الناعم وكان 2.6 الركام الناعم ذا تدرج مطابق للمواصفة القياسية العراقية (IQS, No.45, 1980). الجدول (3) يبين الوزن النوعي و الامتصاص للركام الناعم.

3-2: الركام الخشن: تم استخدام الحصى النهري المحلي المتوفر في أطراف مدينة الموصل و بمقاس أقصى للركام (10mm)، تم غسل الركام الناعم للتخلص من المواد الطينية، يبين الجدول (3) الوزن النوعي للركام الخشن المستخدم في هذا البحث و الامتصاص، تدرج الركام الخشن وفقاً للمواصفة القياسية العراقية (IQS, No. 45, 1980).

الجدول (1) الخصائص الكيميائية للسمنت

Chemical Composition	Value %	Limits %	Chemical Components	Value %	Limits %
SiO ₂	20.8	---	C ₃ S	57.06	---
AL ₂ O ₃	4.28	---	C ₂ S	16.59	---
Fe ₂ O ₃	5.00	---	C ₃ A	2.89	5
CaO	62.32	---	C ₄ AF	15.22	---
MgO	2.95	5	L.S.F.	0.916	---
SO ₃	1.78	2.3	Solid solution	17.50	---
Free Lime	1.18	---			---
Loss on ignition	2.83	3			---
Insoluble residue	0.75	1.5			---
Total	99.97	---			---

الجدول (2) الخصائص الفيزيائية للسمنت

Physical properties	Test results	Limits of Iraqi Specification NO.5/1984
Setting time (vicat's apparatus)		
Initial setting time, hrs: min.	1:20	≥1 hr
Final setting time, hrs: min.	2:40	≤10 hrs
Fineness	2%	≤10%
Compressive strength		
3days, N/mm ²	26.6	≥15
7days, N/mm ²	33.2	≥23

الجدول (3) الوزن النوعي و الامتصاص للركام الناعم و الخشن

Physical properties	Test results	
	Sand	Gravel
Specific gravity	2.60	2.63
Absorption	1%	1%
Bulk density	1850 kg/m ³	1650 kg/m ³

4-2: الماء : استخدم ماء الشرب الاعتيادي في مدينة الموصل لجميع المزجات الخرسانية المستخدمة في هذا البحث.

5-2: الملدن الفائق (Superplasticizer): في هذا البحث استخدم ملدن باسم ((PVF-H (modified)) لتقليل ماء المزجة بجرعة بالنسبة لوزن الاسمنت مقدارها بين (0.6%-0.7%) كما هو موصى من قبل الشركة المنتجة، الملدن يحسن خصائص الخرسانة.

6-2: الألياف الفولاذية: استخدمت ألياف فولاذية في هذا البحث مصنوعة من الحديد ذات مقطع دائري و ذات شكل متموج (crimped) بطول 50 ملم و قطر 1 ملم و نسبة باعية 50 و الجدول (4) يبين مواصفات الياف الفولاذ.

الجدول (4) مواصفات الألياف الفولاذية

Fiber type	Tensile strength (MPa)	Young modulus (GPa)	Ultimate Elongation percent	Specific Gravity
steel	>1000	200	30-25	7.85

7-2: غبار السليكا: هي مادة تتكون من حبيبات دقيقة جداً مساحتها السطحية حوالي أربعة إلى خمسة أمثال المساحة السطحية للاسمنت و هي ناتج ثانوى في صناعة سبائك السيليكون والفيروسليكون. الجدول (5) يبين الخصائص الفيزيائية لغبار السليكا.

الجدول (5) الخصائص الفيزيائية لغبار السليكا مع المواصفة ASTM C1240-03

Physical properties	Standard limits	SF
Specific surface area, min, (m ² /g)	15	20
Strength activity Index with Portland cement at 7days, min. percent of control.	105	196
Percent retained on 45µm (No.325), max, %	10	7

صممت المزجة الخرسانية عالية المقاومة بالاعتماد على المواصفة (ACI 211.4R-08) [6] و الجدول (6) يبين نسب المزج وكمية المواد للمتر المكعب الواحد من المزجة.

في هذا البحث تم اجراء الفحوصات المبينة أدناه للحصول على الخصائص الميكانيكية للخرسانة عالية المقاومة وحسب المواصفات المبينة مع كل فحص:

أ- فحص مقاومة الانضغاط: تم الفحص لمقاومة الانضغاط و حسب المواصفة البريطانية (BS 1881-116) (1983) وباستخدام نماذج مكعبة الشكل (100mm) 12 نموذج و تم قياس مقاومة الانضغاط بأعمار (7,28,56,90) يوم.

ب- فحص الشد الانشطاري: تم فحص مقاومة الشد الانشطاري و النماذج المعدة للفحص اسطوانة بأبعاد (300mm×150mm) ثلاثة نماذج لكل مزجة وبعمر (28) يوم والفحص حسب المواصفة (BS 1881-117) لعام (1983).

ت- فحص مقاومة الانثناء: تم فحص النماذج المعدة لمقاومة الانثناء و التي هي عبارة عن عتبة بأبعاد (500mm×100mm×100mm) ثلاثة نماذج لكل مزجة وبعمر (28) يوم والفحص حسب المواصفة (BS 1881-118) (1983).

ث- منحنى الاجهاد و الانفعال و معامل المرونة: تم فحص النماذج المعدة لمنحنى الاجهاد و الانفعال و معامل المرونة و التي عبارة عن اسطوانة بأبعاد (300mm×150mm) ثلاثة نماذج لكل مزجة وبعمر (28) يوم والفحص حسب

المواصفة (ASTM C 469-94) و باستخدام جهاز (Compressometer) و جهاز (Dial gague) و جهاز لتسليط ضغط (ALPH) و تم بعد ذلك رسم منحنى الإجهاد و الانفعال و حساب معامل المرونة لكل المزجات الخرسانية.

ج-

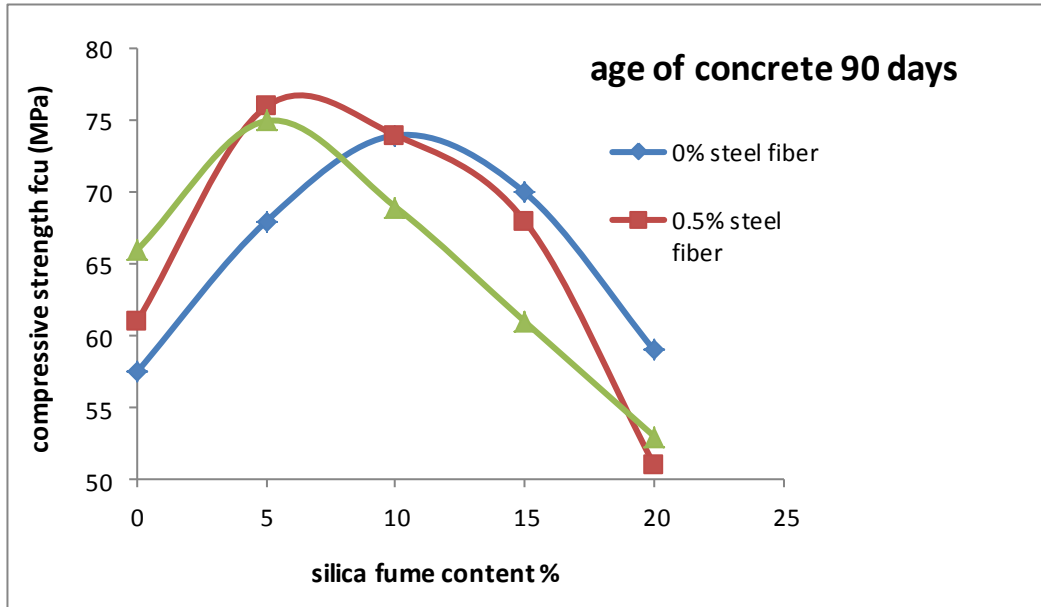
الجدول (6) نسب المواد للمزجة المرجعية

Weight percent%	Superplasticier L/M ³	Water Kg/m ³	Sand Kg/m ³	Coarse Kg/m ³	Cement Kg/m ³
1:1.11:1.69:0.285:0.008	4.74	169	658	1000	593

3-النتائج و المناقشة

3-1: مقاومة الانضغاط

لغبار السليكا و الالياف الفولاذية تأثير على مقاومة الانضغاط موضع في الشكل (1) و الجدول (7). تبين النتائج ان اضافة غبار السليكا بنسب محددة تزيد مقاومة الانضغاط للخرسانة و عندما تزداد كمية غبار السليكا المضافة تؤدي الى نقصان في المقاومة و النسبة الامثل لغبار السليكا تتغير مع وجود الالياف الفولاذية، حيث ان النسبة المثلى كانت 10% في الخرسانة الخالية من الالياف الفولاذية عند عمر 90 يوم و 5% في الخرسانة الحاوية على الالياف الفولاذية. لغبار السليكا تأثير على مقاومة الانضغاط من خلال التفاعل مع المركب كالسيوم هيدروكسيد (Calcium Hydroxide(CH) الناتج من تميؤ الاسمنت و ينتج المركب كالسيوم سلكيات هايدريت (Calcium Silicate Hydrates(CSH) الذي بدوره يقوي الترابط بين مونة الاسمنت و السطح الخارجي للحصى، لغبار السليكا تأثير في خصائص الخرسانة باتجاهين، من خلال تفاعل غبار السليكا مع المركب كالسيوم هيدروكسيد (CH) و من خلال ملء الفراغات متناهية الصغر. اما الالياف الفولاذية فان تأثيرها واضح في زيادة مقاومة الانضغاط مع زيادة نسبتها في المزجة الخرسانية بغياب غبار السليكا اما بوجود غبار السليكا و بنسبة اكبر من 5% فان تأثيرها ينعكس سلبيا على مقاومة الانضغاط حيث تقل المقاومة بزيادة نسبة الالياف الفولاذية المترافقة مع زيادة غبار السليكا و كما مبين في الشكل (4).



الشكل (1) تأثير غبار السليكا على مقاومة انضغاط الخرسانة

الجدول (7) قيم مقاومة الانضغاط للمزجات الخرسانية

Mix designation	SF % by weight of cement	Steel fiber % by volume of concrete	Compressive Strength (MPa)			
			7 Days (S7 d)	28 Days (S28 d)	56 Days (S56 d)	90 Days (S90 d)
M 11	0	0.0	36.5	45	52.0	57.5
M 12	0	0.5	39.8	48	54.8	61.0
M 13	0	1.0	47.0	62	65.0	66.0
M 21	5	0.0	42.0	64	65.0	68.0
M 22	5	0.5	50.0	60	66.0	76.0
M 23	5	1.0	48.0	57	65.0	75.0
M 31	10	0.0	46.0	56	66.0	74.0
M 32	10	0.5	44.0	55	64.0	74.0
M 33	10	1.0	48.0	55	60.0	69.0
M 41	15	0.0	45.0	55	66.0	70.0
M 42	15	0.5	47.0	57	63.0	68.0
M 43	15	1.0	32.0	47	59.0	61.0
M 51	20	0.0	39.0	47	56.0	59.0
M 52	20	0.5	41.0	47	49.0	51.0
M 53	20	1.0	38.0	48	50.0	53.0

تم تمثيل العلاقة بين مقاومة الانضغاط للنموذج المكعب (100mm) مع مقاومة الانضغاط للنموذج الاسطواني بابعاد (300mm×150mm) بالمعادلة الآتية:

$$f_{cu} = 1.226f_c \quad (1)$$

و يمكن تمثيل العلاقة بين مقاومة الانضغاط بعمر ثمان وعشرون يوماً و نسبة غبار السليكا و الالياف الفولاذية في المزجة الخرسانية و مقاومة الانضغاط للمزجة المرجعية بعمر ثمان و عشرين يوماً بالمعادلة الآتية:

$$f_c = f_{cr} + 938.24v_f + 33.7w_{st} - 7741.6v_f w_{st} \quad (2)$$

2-3: مقاومة الانثناء

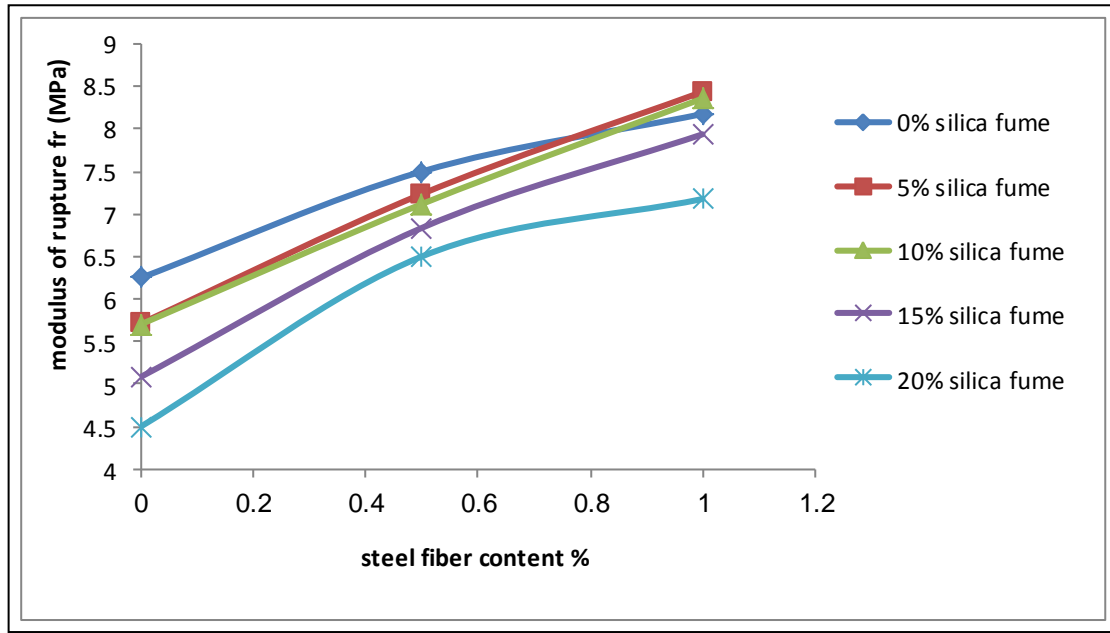
تعد مقاومة الانثناء من الخواص الميكانيكية للخرسانة عالية المقاومة وهي خاصية مهمة بالنسبة لتحمل العزوم، سجل الباحثون [11،10،9] مدى لقيم مقاومة الانثناء للخرسانة عالية المقاومة و كانت تتراوح بين $0.62\sqrt{f_c}$ و $0.99\sqrt{f_c}$ ، يلاحظ من الشكل (2) و الجدول (8) أن قيم مقاومة الانثناء للخرسانة عالية المقاومة بدون الياف فولاذية تكون ضمن مدى القيم للباحثين، الا أن اضافة الالياف الفولاذية أدت الى ظهور مقاومة انثناء أعلى. كذلك يلاحظ انخفاض مقاومة الانثناء للخرسانة بإضافة غبار السليكا، حيث أن مقاومة الانثناء للمزجات الخرسانية الحاوية على غبار السليكا بنسب (5, 10, 15, 20) و بدون ألياف فولاذية قد انخفضت بنسب (10, 10, 19, 29) نسبة الى مقاومة الانثناء للمزجة المرجعية، و بشكل عام فان اضافة غبار السليكا الى المزجة الخرسانية يؤثر سلبياً على مقاومة الانثناء و يزداد تأثير غبار السليكا مع زيادة نسبة اضافتها الى المزجة الخرسانية و ذلك لزيادة قسافة الخرسانة. كما يلاحظ أن زيادة مقاومة الانثناء مع اضافة الالياف الفولاذية الى المزجة الخرسانية، نسبة مقاومة الانثناء للمزجات الخرسانية الحاوية على غبار السليكا بنسب (0, 5, 10, 15, 20) و الحاوية على ألياف فولاذية بنسبة (0.5%) الى مقاومة الانثناء للمزجة المرجعية بلغت (19, 14, 14, 10, 3) على التوالي، في حين أن النسبة للمزجات الخرسانية الحاوية على ألياف فولاذية بنسبة (1%) بلغت (30, 33, 27, 14) على التوالي. ان سبب زيادة مقاومة الانثناء بإضافة الالياف الفولاذية يعود الى تحسن مقاومة الشد للخرسانة بسبب مقاومة الشد العالية للألياف الفولاذية و تحمل الالياف الفولاذية للحمل المسلط بعد حدوث الشقوق في الخرسانة الى ان تصل الشقوق الى سطوح التماسك بين الالياف الفولاذية و المونة و يتجاوز اجهاد

القص مقاومة التماسك العظمى عندئذ يحدث الفشل، علماً أن الفشل في الانتشاء يحدث خلال الخرسانة و يسبب انفصال (سحب) الألياف الفولاذية في منطقة الفشل عن المونة و لا يسبب الفشل قطع الالياف الفولاذية.

يختلف سلوك الخرسانة عند اضافة الالياف الفولاذية فالخرسانة الغير مسلحة بالالياف الفولاذية تفشل بصورة فجائية و لكن بوجود الألياف الفولاذية يختلف شكل الفشل في الخرسانة حيث تتولد الشقوق ببطء، الفشل النهائي يحدث بسبب تولد شقوق غير المستقرة عندما تنسحب الألياف الفولاذية ويصل اجهاد القص بين السطوح لمقاومة التماسك العظمى [8,14].

تم تمثيل العلاقة بين مقاومة الانتشاء للمزجة الخرسانية و مقاومة الانتشاء للمزجة المرجعية و نسب الالياف الفولاذية و نسب غبار السليكا في المعادلة الآتية:

$$f_r = f_{rr} + 250v_f - 7.4w_{si} \quad (3)$$



الشكل (2) تغير مقاومة الانتشاء مع محتوى ألياف الفولاذ

3-3: مقاومة الشد الانشطاري

مقاومة الشد الانشطاري بشكل عام تعد من الخواص المهمة في الخرسانة لمقاومة التشققات الناتجة من الانكماش و تغيرات درجات الحرارة. تبلغ مقاومة الشد الانشطاري حوالي 5% من مقاومة انضغاط الخرسانة عالية المقاومة و تبلغ مقاومة الشد الانشطاري تقريبا نسبة 70% من مقاومة الانتشاء بعمر ثمانية وعشرين يوماً (Dewar) [13] (1964).

الجدول (9) يبين قيم مقاومة الشد الانشطاري للمزجات الخرسانية وتأثير غبار السليكا و الالياف الفولاذية عليها. معدل نسبة مقاومة الشد الانشطاري الى مقاومة انضغاط الخرسانة للنموذج بحجم اسطواني (300mm×150mm) بعمر ثمان وعشرين يوماً بلغت 10% ومعدل نسبة مقاومة الشد الانشطاري الى مقاومة الانتشاء للنموذج بحجم رافدة (500mm×100mm×100mm) بلغت 65%.

الجدول (8) قيم مقاومة الانثناء

Mix Designation	Modulus of Rupture (MPa) (f_r)	$0.62\sqrt{f_c}$ Eq ACI 318-05 (MPa)	$0.99\sqrt{f_c}$ (MPa)	(f_r/f_{rr})
M 11= f_{rr}	6.3	4.0	6.0	1.00
M 12	7.5	4.1	6.2	1.19
M 13	8.2	4.5	6.7	1.30
M 21	5.7	4.5	6.8	0.90
M 22	7.2	4.4	6.6	1.14
M 23	8.4	4.4	6.6	1.33
M 31	5.7	4.4	6.4	0.90
M 32	7.2	4.3	6.4	1.14
M 33	8.4	4.3	6.5	1.33
M 41	5.1	4.5	6.7	0.81
M 42	6.9	4.2	6.3	1.10
M 43	8.0	4.0	6.0	1.27
M 51	4.5	4.1	6.1	0.71
M 52	6.5	4.1	6.1	1.03
M 53	7.2	4.1	6.2	1.14

من خلال الجدول (9) يلاحظ أن مقاومة الشد الانشطاري للمزجة الخرسانية الحاوية على نسبة غبار السليكا % (5، 10، 15، 20) و بدون ألياف فولاذية زادت بمقدار (33%، 17%، 13%، 9%) على التوالي و هذا يدل على أن زيادة نسبة غبار السليكا يؤثر على مقاومة الشد الانشطاري و أن النسبة الأمثل هي 5%. و على العموم فإن مقاومة الشد الانشطاري تزداد بزيادة الألياف الفولاذية في المزجة الخرسانية و أن أعلى زيادة كانت عند نسبة غبار السليكا 5% و نسبة الألياف الفولاذية 0.5% و 1%، و السبب في الزيادة يعود إلى فعالية الألياف الفولاذية و التي تتوزع بشكل عشوائي في الخلطة الخرسانية و التي تكبح تكوين الشقوق و إلى مقاومة الشد العالية للألياف نفسها و إلى الترابط بين الألياف الفولاذية و مكونات الخرسانة الأخرى فهي تزيد مقاومة الشد للخرسانة [16, 10, 15, 2]. إن الخرسانة تظهر سلوكاً عند الفشل يختلف بشكل جذري عند إضافة الألياف الفولاذية فالخرسانة غير المسلحة بالألياف الفولاذية تتصرف بعد وصولها إلى إجهاد الشد الأعظم تفشل بصورة فجائية بعد حصول الفشل الأولي و من دون أي تحذير بينما عند إضافة الألياف الفولاذية تتغير سلوك الخرسانة فبعد حدوث الشقوق الأولية لا يحدث فشل فجائي بسبب الألياف الفولاذية بل تستمر في المقاومة إلى أن يزداد تولد الشقوق نتيجة الاجهاد المتزايد الناتج من زيادة الحمل و تصل مرحلة الفشل.

يلاحظ من الجدول (9) تقارب قيم مقاومة الشد الانشطاري للمزجة المرجعية مع القيم الناتجة من معادلة الكود (ACI 318-05) و ازدياد قيم مقاومة الشد الانشطاري لبقية المزجات الخرسانية عن القيم الناتجة من معادلة الكود لبقية المزجات الخرسانية و السبب يعود إلى فعالية غبار السليكا و الألياف الفولاذية في زيادة مقاومة الشد الانشطاري للخرسانة.

و تم تمثيل العلاقة بين مقاومة الشد الانشطاري للمزجات الخرسانية و مقاومة الشد الانشطاري للمزجة المرجعية ونسب الألياف الفولاذية ونسب غبار السليكا من خلال المعادلة الآتية:

$$f_{sp} = f_{spr} + 83.5v_f + 2.6w_{si} \quad (4)$$

الجدول (9) قيم مقاومة الشد الانشطاري

Mix Designation	Splitting Tensile Strength f_{sp28} (days) (MPa)	$\frac{f_{sp}}{f_{spr}}$	$\frac{f_{sp}}{f_c}$	$\frac{f_{sp}}{f_r}$	(MPa) $0.56\sqrt{f_c}$ (Eq ACI 318-05)
M 11 = f_{spr}	3.50	1.00	0.09	0.56	3.4
M 12	3.80	1.09	0.09	0.51	3.5
M 13	4.33	1.24	0.09	0.53	3.8
M 21	4.66	1.33	0.09	0.86	3.8
M 22	4.96	1.42	0.11	0.69	3.8
M 23	4.96	1.42	0.11	0.59	3.7
M 31	4.11	1.17	0.09	0.72	3.6
M 32	4.25	1.21	0.10	0.60	3.6
M 33	4.25	1.21	0.09	0.51	3.7
M 41	3.97	1.13	0.09	0.79	3.8
M 42	4.11	1.17	0.10	0.61	3.6
M 43	4.25	1.21	0.11	0.54	3.4
M 51	3.8	1.09	0.10	0.84	3.4
M 52	4.46	1.27	0.12	0.69	3.5
M 53	4.82	1.38	0.12	0.67	3.5

4-3: منحنى الإجهاد و الانفعال

من العلاقات المهمة التي ينبغي دراستها هي علاقة الاجهاد بالانفعال للخرسانة التي تعطي صورة واضحة عن سلوك الخرسانة مع تسليط الاحمال و تبين شكل الفشل للخرسانة و توضح مرحلة الانفعال المرن و اللدن.

يتبين من الاشكال (3) و (4) و (5) و الجدول (10) ارتفاع مرحلة الاجهاد العظمى للخرسانة بإضافة غبار السليكا و ازدياد معامل المرونة مقارنة بالمزجة المرجعية، السبب في الارتفاع مرحلة الاجهاد العظمى و ازدياد معامل المرونة هو فعالية غبار السليكا في زيادة مقاومة الانضغاط للخرسانة و المشار اليها في مقاومة الانضغاط.

كما يلاحظ استمرار الانفعال لمسافة أطول مع اضافة الالياف الفولاذية الى المزجة الخرسانية و زيادة المساحة تحت المنحنى للمزجات الخرسانية الحاوية على الياف فولاذية و السبب يعود إلى فعالية الالياف الفولاذية في حجز الشقوق و إسنادها لحين فشل المونة المحيطة بالالياف الفولاذية وحين حدوث الفشل في النهاية نلاحظ تهشم الخرسانة بنسبة كبيرة في النهاية وسحب الالياف الفولاذية يحتاج الى امتصاص طاقة [8] و ذلك يعطي دلالة على أن الالياف الفولاذية قد أعطت دعما لتحمل الخرسانة و مقدره على تحمل الانفعال و الاجهاد مما لو كانت الخرسانة غير مسلحة بالالياف الفولاذية تم مقارنة منحنى الاجهاد و الانفعال العملي مع الناتج من المعادلة (5) و كانت النتائج متوافقة.

تم تمثيل منحنى الإجهاد و الانفعال بمعادلة تجريبية استخرجت بتحليل البيانات العملية:

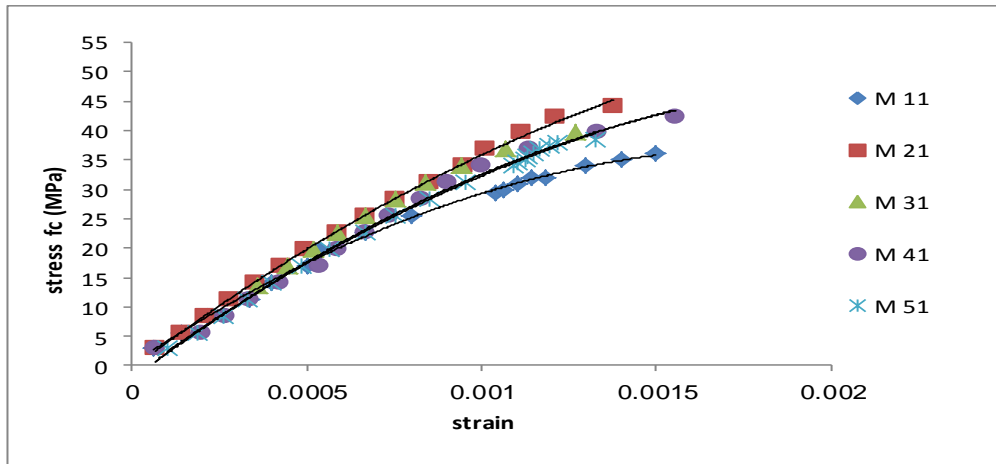
$$y = \frac{(ax)}{(a - 1 + x^b)} \quad (5)$$

حيث أن قيم كل من (a, b) تستخرج من المعادلتين الآتيتين:

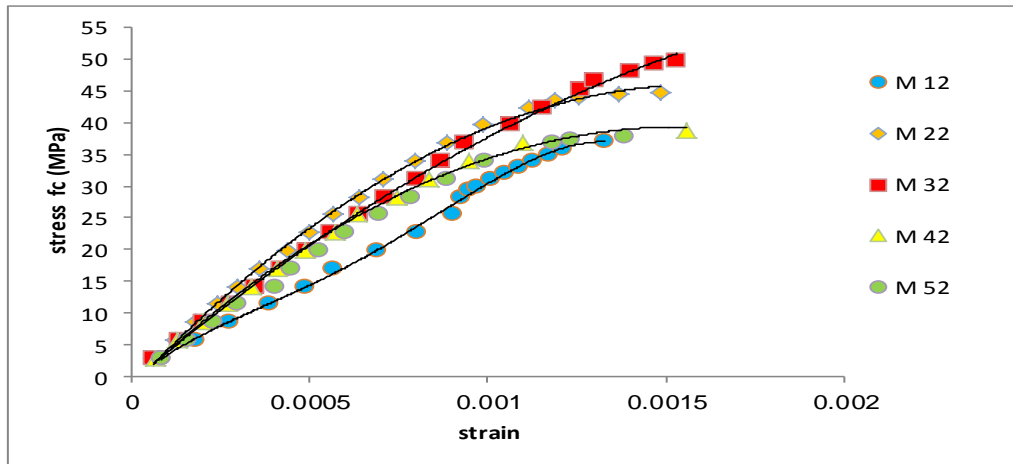
$$a = 2.257 + 6.435w_{si} + 40.048v_f - 1014.339w_{si}v_f \quad (6)$$

$$b = 1.988 + 8.484w_{si} + 37.955v_f - 1236.972w_{si}v_f \quad (7)$$

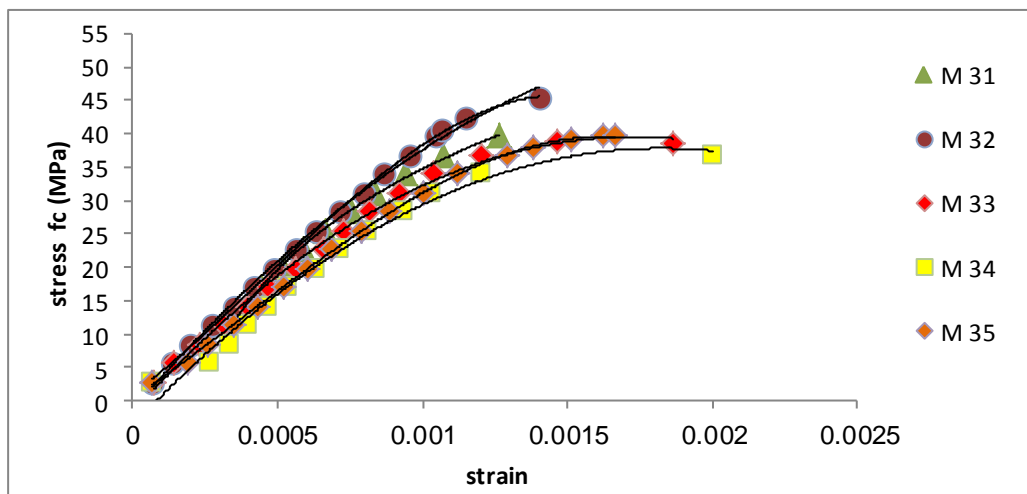
حيث باستخدام هذين المتغيرين ومقاومة الانضغاط العظمى (f_c) والإجهاد التابع لها (ϵ) بالامكان رسم منحنى الاجهاد و الانفعال لنسب مختلفة من غبار السليكا و ألياف الفولاذ.



الشكل (3) تأثير غبار السليكا على منحنى الاجهاد و الانفعال (بدون اليااف فولاذية)



الشكل (4) تأثير غبار السليكا على منحنى الاجهاد و الانفعال (نسبة اليااف الفولاذية 0.5%)



الشكل (5) تأثير غبار السليكا على منحنى الاجهاد و الانفعال (نسبة اليااف الفولاذية 1%)

الجدول (10) الاجهاد و الانفعال الاقصى للمزجات الخرسانية

Designation Mix	f_c (MPa) (28 days)	strain at failure	(f_c/f_{cr})
M 11= (f_{cr})	36.70	0.0015000	1.00
M 12	39.16	0.0012467	1.07
M 13	45.70	0.0014333	1.25
M 21	47.10	0.0015333	1.28
M 22	45.10	0.0014867	1.23
M 23	44.50	0.0014000	1.21
M 31	42.00	0.0012667	1.14
M 32	41.80	0.0015333	1.14
M 33	43.20	0.0014667	1.17
M 41	46.40	0.0015600	1.26
M 42	40.60	0.0015600	1.10
M 43	37.90	0.0020000	1.03
M 51	37.80	0.0013267	1.03
M 52	38.50	0.0013867	1.05
M 53	39.40	0.0016667	1.07

5-3 : معامل المرونة

الجدول (11) قيم معامل المرونة

Designation Mix	Modulus of elasticity (MPa)	(E_c/E_{cr})
M 11= (E_{cr})	31914	1.00
M 12	33883	1.06
M 13	36825	1.15
M 21	39875	1.25
M 22	40146	1.26
M 23	40474	1.27
M 31	38106	1.19
M 32	37733	1.18
M 33	39722	1.25
M 41	36553	1.15
M 42	36600	1.15
M 43	36487	1.14
M 51	36000	1.13
M 52	37900	1.19
M 53	39737	1.25

معامل المرونة: يعبر عن العلاقة بين الاجهاد المسلط و الانفعال الناتج. يتميز معامل المرونة بأنه يعتمد على عدة عوامل، نذكر منها نسب المزج، نسبة الماء الى المواد الاسمنتية، مقاومة الخرسانة، كثافة الخرسانة، عمر الخرسانة، نوع الركام، نظريا معامل المرونة للخرسانة يعتمد أيضا على معامل المرونة لمونة السمنت و الركام و نسبة مونة السمنت و الركام في المزجة الخرسانية، بما أن الركام يشغل حيزاً كبيراً من حجم الخرسانة لذا فإن معامل المرونة يتأثر بشكل كبير بالركام و في الوقت نفسه يتأثر معامل المرونة بمقدار كبير بمقاومة التماسك بين مونة السمنت و الركام. من خلال الجدول (11) يلاحظ أن معامل المرونة للمزجات الخرسانية الحاوية على غبار السليكا بنسب (5, 10, 15, 20) و بدون ألياف فولاذية قد ازداد بنسب (25, 19, 15, 13) نسبة الى معامل المرونة للمزجة المرجعية، كما يلاحظ زيادة معامل المرونة مع اضافة الالياف الفولاذية الى المزجة الخرسانية، حيث ان نسبة معامل المرونة للمزجات الخرسانية الحاوية على غبار السليكا بنسب (0, 5, 10, 15, 20) و الحاوية على ألياف

فولاذية بنسبة (0.5%) الى معامل المرونة للمزجة المرجعية بلغت (6, 26, 18, 15, 19) على التوالي، في حين أن تلك النسب بلغت (15, 27, 25, 14, 25) للخرسانة الحاوية على ألياف فولاذية بنسبة (1%).

تم تمثيل العلاقة بين معامل المرونة للنموذج الاسطواني بحجم (300mm×150mm) و معامل المرونة للنموذج الاسطواني بحجم (300mm×150mm) للمزجة المرجعية و نسب الالياف الفولاذية و نسب غبار السليكا في المعادلة الآتية:

$$E_c = E_{Cr} + 464271V_f + 27719w_{si} \quad (8)$$

4: الاستنتاجات

لقد تم التوصل الى الاستنتاجات التالية على ضوء النتائج المقدمة من خلال الدراسة الحالية و كما يأتي:

- 1- اضافة غبار السليكا يزيد مقاومة انضغاط الخرسانة و كانت أعلى نسبة زيادة تحققت عند نسبة غبار السليكا 5% و نسبة ألياف فولاذية 0.5% و بلغت 32% نسبة الى المزجة المرجعية و بعمر تسعين يوماً.
- 2- اضافة غبار السليكا يقلل مقاومة الانتشاء بدون ألياف فولاذية.
- 3- اضافة الالياف فولاذية يزيد مقاومة الانتشاء، أعلى نسبة زيادة تحققت عند نسبة الياف فولاذية 1% و بلغت (33%) عند نسبة غبار السليكا 0%.
- 4- اضافة غبار السليكا يزيد مقاومة الشد الانشطاري و تحققت أعلى نسبة زيادة عند نسبة 5% و نسبة ألياف فولاذية 1% بلغت (42%) نسبة الى مقاومة الشد الانشطاري للمزجة المرجعية.
- 5- اضافة غبار السليكا يزيد معامل المرونة عموماً، أعلى نسبة زيادة تحققت عند نسبة غبار السليكا 5% و نسبة ألياف فولاذية 1% بلغت (27%) بعمر ثمان و عشرين يوماً.

المصادر

- 1- ACI Committee 363 (2010) "Report on High-Strength Concrete" (ACI 363R-10), American Concrete Institute.
- 2- Samman, T. A. , Wafa, F. F. , Radain, T. A. "Mechanical Properties of Normal and High-Strength Concrete with Steel Fibers" JKAU:Eng.Sci.,vol.12,no.1,pp. 87-104 (1420 A.H./1999 A.D.).
- 3- صالح, شاكراً أحمد و رجب, سعيد خلف و نجم, خالد بتال "تأثير الألياف الحديدية على الخواص الميكانيكية للخرسانة العالية الاداء" مجلة الرافدين, العدد 13, الموضوع 4, (2005).
- 4- Katkhuda, H., Hanayneh, B. And Shatarat, N. "Influence of Silica Fume on High Strength Lightweight Concrete", World Academy of Science, Engineering and Technology 5-8-2009, pp.781-788.
- 5- Sarsam, K. & Azzawi, Z. M. "Mechanical Properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete" Eng. & Tech. Journal, Vol.28, N0, 12, 2010.
- 6- ACI Committee 211 (2008) "Guide for Selecting Proportions For High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials" (ACI 211.4R-08), American Concrete Institute.
- 7- Hariharan, A.R., Santhi, A.S. & Ganesh, G.M. "Study on Strength Development of High Strength Concrete Containing Fly ash and Silica Fume" International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), Apr 2011, Vol.3 No. 4.
- 8- Pawade, P.Y., Pande, A.M. & Nagarnaik, P.B. "Effect of Steel Fibers on Modulus of Elasticity of Concrete" International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies (IJAEST), 2003 Vol 12 No.7, Issue No.2 , 169-177.
- 9- ACI Committee E-701 (2001) "Cementitious Materials For Concrete", (ACI Education Bulletin E3-01), American Concrete Institute.
- 10- ACI Committee 234 (2000) "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete"(ACI 234R-96), American Concrete Institute.
- 11- Ashour, S.A. & Wafa, F.F. "Effect of Steel Fibers on The Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams with Low Flexural Reinforcement" The Fourth Engineering Conference, Nov., 1995, Volume 2.

- 12- Parrott, L. J., "The Properties of High Strength Concrete" Technical Report No. 42.417, 1969, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, pp. 12
- 13- Dewar, J. D., "The Indirect Tensile Strength of Concretes of High Compressive Strength" Technical Report No. 42.377, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1964, Mar., pp. 12.
- 14- Gao, J. W. & Morino, K. "Mechanical Properties of Steel Fiber-reinforced, High-strength, Lightweight Concrete" cement and concrete composites 19(1997), pp.307-313.
- 15- Zhang, M. H. , Li L. & Paramasivam, P. "Shrinkage of high-strength Lightweight Aggregate Concrete Exposed to Dry Environment " ACI Materials Journal, March-April 2005,pp.86-92.
- 16- Zia, P., Ahmad, S., and Leming, M., "High-Performance Concretes: A State-of-Art Report (1989-1994)," FHWA-RD-97-030, 1997, Federal Highway Administration.

تم اجراء البحث في كلية الهندسة = جامعة الموصل