



سلوك الانثناء في العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع T والمعززة بألياف البولي بروبيلين والحديد الهجينة

مازن برهان الدين عبد الرحمن¹ ، عزالدين سليمان نجم²
^{1,2} قسم الهندسة المدنية، جامعة تكريت، صلاح الدين، العراق

الخلاصة

في هذا البحث تم دراسة تأثير اضافة الياف البولي بروبيلين، الالياف الحديدية، والالياف الهجينة التي تتكون من (50% الياف بولي بروبيلين+50% الياف حديدية) بنسب حجمية مختلفة (0.25% ، 0.75% ، 1.25%) على سلوك العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع على شكل T في الانثناء تحت الاحمال الساكنة.

ولإجراء هذه الدراسة تم تحضير عشرة خلطات خرسانية واحدة منها للخرسانة عالية المقاومة المرجعية الخالية من الالياف، والاخرى تحتوي على الالياف بالأنواع والنسب الحجمية المذكورة، لكل نوع من انواع الخلطات الخرسانية تم صب ثلاثة عتبات خرسانية مسلحة ذات مقطع على شكل T، وثلاثة مكعبات قياسية (150x150x150mm)، وثلاثة اسطوانات قياسية (150x300mm)، نسبة الماء الى الاسمنت كانت ثابتة في كافة الخلطات الخرسانية ومساوية الى (0.38)، وأستخدم الملدن الفائق بنسبة (3%) من وزن المواد الاسمنتية، وغبار السليكا بنسبة (10%) كاستبدال جزئي للإسمنت لتحسين ترابط الالياف مع المزيج الخرساني.

لمعرفة الخصائص الميكانيكية للخرسانة المتصلبة تم اجراء فحص مقاومة الانضغاط وفحص شد الانشطار بعمر 28 يوم، وقد اظهرت النتائج بان اضافة الياف البولي بروبيلين ليس له تأثير كبير على الخواص الميكانيكية للخرسانة عالية المقاومة، كما اظهرت النتائج ان مقاومة الانضغاط، ومقاومة شد الانشطار تزداد بزيادة النسبة الحجمية للألياف الحديدية وكانت اعلى نسبة زيادة بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية هي (24.5%) و (43%) على التوالي عند النسبة الحجمية (1.25%)، أما عند اضافة الالياف الهجينة فان ذلك ادى الى تحسين مقاومة الانضغاط، ومقاومة شد الانشطار بانخفاض طفيف عن افضل النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام الالياف الحديدية.

كما تم اجراء فحص مقاومة الانثناء على كافة العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع T، كانت هذه العتبات بسيطة الاسناد بطول (1 m) وعرضت لحمل مسلط في نقطتين بمعدل ازاحة ثابت. وقد تم قياس الحمل والادود في منتصف فضاء العتبة خلال هذا الفحص. وقد اظهرت النتائج العملية ان اضافة الياف البولي بروبيلين لها تأثير قليل على سلوك العتبة في الانثناء في المراحل الاولى للتحميل لحد الخضوع، في حين كان لها تأثير واضح في مرحلة ما بعد الخضوع في تحسين المطيلية وممانعة الانثناء (امتصاص الطاقة) حيث يزداد الحمل الاقصى والادود الاقصى بزيادة النسبة الحجمية لهذه الالياف، كما اظهرت النتائج زيادة حمل التشقق وحمل الخضوع والحمل الاقصى بزيادة النسبة الحجمية للألياف الحديدية مع نقصان الادود المقابل لهما، وبينما تعمل الالياف الحديدية على زيادة المطيلية فان هذه الزيادة تقل بزيادة النسبة الحجمية للألياف الحديدية. اما عند استخدام الالياف الهجينة فقد اظهرت النتائج تحسن حمل التشقق، حمل الخضوع، والحمل الاقصى، والمطيلية، والممانعة في كافة مراحل التحميل.

الكلمات الدالة: الالياف الهجينة، الخرسانة عالية المقاومة، مقاومة الانثناء، العتبة ذات المقطع T

Flexural Behavior of Hybrid Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete T- Beam

Abstract

The effect of polypropylene fibers, steel fibers and hybrid polypropylene - steel fibers which consist of (50% polypropylene fiber+50% steel fiber), with various volume fractions 0.25%, 0.75% and 1.25% on the flexural behavior of Reinforced concrete T-beams under static load was investigated in this research.

To carry out this research ten concrete mixes were prepared one for reference high strength concrete (without fiber), and the other contain all types and volume fractions of fibers. For each

mix three reinforced concrete T-beams, three cubes (150×150×150mm) and three cylinders (150×300mm) were casted. Water cement ratio was constant 0.38, silica fume with ratio of 10% as a partial replacement by weight of cement and super plasticizer with ratio of 3% by weight of the cementitious material were add to enhance the bond between fiber and cement matrix.

28-day compressive strength and split tensile strength tests were made on hardened concrete specimen. The result showed that polypropylene fiber had little effect on mechanical properties of the high strength concrete. Compressive strength and splitting tensile strength of the steel fiber-reinforced concrete improved with increasing the volume fraction, achieving 24.5%, 43%, respectively, at 1.25% volume fraction. On the other hand, the addition of Hybrid fiber to high strength concrete improved compressive strength and splitting tensile stress with slight decrease as compared with the best improvement.

All of the reinforced concrete T-beams were tested in flexure using controlled displacement two point loads applied on simply supported T-beams, during this test the load and deflection at mid span were measured. The result shows that the addition of polypropylene fiber had a little effect on the behavior of reinforced concrete T-beam at first steps of loading until yielding load, while, it was more effective in improving ductility and toughness (energy absorption) where the ultimate load and max deflection were increased with increasing volume fraction. The addition of steel fiber increased the cracking load, yield load and ultimate load capacity with increasing volume fraction, at the same time reduce deflection. The ductility improved by the addition of steel fiber, but this improvement decreased with increasing the volume fraction. The addition of hybrid fiber improved crack load, yield load, ultimate load, ductility and toughness at all steps of loading.

Keywords: Hybrid fiber, High-Strength Concrete, Flexural Strength, T-Beam

المقدمة

في عام 2003 وجد الباحث (Li Bei-xing) واخرون [4] إن المحتوى المنخفض من الياف البولي بروبيلين (0.91kg/m^3) في الخرسانة يسبب انخفاض طفيف في مقاومة الانضغاط ويزيد بشكل ملحوظ مقاومة الانثناء ويزيد بدرجة اوضح المتانة. كما وجد الباحثان (Wu و Yao, Li) في عام 2003 [5] إن استخدام نوعين من الالياف (الياف البولي بروبيلين والالياف الحديدية) والتي تعرف ايضا بالالياف الهجينة بنسب حجمية (0.2% ، 0.3%) على التوالي ادى الى تحسين مقاومة الانضغاط ومقاومة شد الانشطار والمتانة.

في عام 1999 قام الباحثان (Abdul-Aha و Aziz) [6] بدراسة المقاومة القصوى في العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع على شكل T والمعززة بالالياف الحديدية. وقد وجدوا بأن وجود الالياف الحديدية يقلل الأود وعرض التشققات بدرجة ملحوظة، ويحسن كذلك المطيلية (ductility) ويزيد مقاومة الانثناء القصوى في هذه العتبات.

الهدف من البحث

يهدف البحث الحالي الى دراسة تأثير إضافة الالياف الحديدية، والياف البولي بروبيلين، والياف الحديد والبولي بروبيلين الهجينة (الحاوية على 50% الياف حديدية و 50% الياف بولي بروبيلين) بنسب حجمية مختلفة (0.25%، 0.75%، 1.25%) على الخصائص الميكانيكية (مقاومة الانضغاط، ومقاومة شد الانشطار) للخرسانة عالية المقاومة، ومقارنتها مع الخصائص الميكانيكية للخرسانة عالية المقاومة المرجعية (الخالية من الالياف)، وكذلك تأثير إضافة الالياف المذكورة على سلوك الخرسانة عالية المقاومة وهي في الحالة الهيكلية. عن طريق تحديد الحمل الاقصى، وحمل التشقق الاول،

تعد العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع على شكل T من الاجزاء المهمة في المنشآت الخرسانية، وهي شائعة الاستخدام في المباني، والجسور وفي مواقف السيارات وغيرها بسبب كفاءتها التصميمية. ونظرا للظهور المبكر للشقوق وزيادة الأود تحت الاحمال العالية يتم استخدام الخرسانة الليفية (fibrous concrete) لغرض تحسين الاداء العام لهذا النوع من العتبات تحت مختلف ظروف الخدمة. كما يتم استخدام الخرسانة عالية المقاومة (HSC) التي تعطي امكانية الحصول على مقاومة انضغاط مرتفعة نسبيا وتسمح للمصمم بإنشاء عتبات اصغر مقطعا أو تقليل كمية حديد التسليح مما يخفض الحمل الميت فيها. هناك نوعان رئيسيان مستخدمان من الالياف: الالياف الحديدية والياف البولي بروبيلين، وتعتبر الالياف الحديدية معقوفة النهايات اكثر الانواع الشائعة استخداما وتعمل على تجسير التشققات، وتزيد من مطيلية ومتانة الخرسانة، اما الياف البولي بروبيلين فهي الياف صناعية بوليميرية تقلل تشققات الانكماش اللدن وتخدم التشققات في محيط حديد التسليح، كما تقلل هطول حبيبات الركام [1]. كما ان العدد الكبير من هذه الالياف قد يزيد من مطيلية ومتانة الخرسانة. ومن اوائل من بحث في هذا الموضوع هما الباحثان (Romualdi و Mandel) [2]، حيث قاما بدراسة عملية لتقليل الشقوق في منطقة الشد في العتبات الخرسانية المعرضة للانثناء عن طريق اضافة قطع صغيرة منفصلة (Discrete) من الاسلاك الفولاذية مباشرة الى الخلطة الخرسانية. في عام 2004 وجد الباحثان (Song و Hwang) [3] في بحثهما، عن الخصائص الميكانيكية للخرسانة عالية المقاومة، بأن القصافة الملحوظة مع قابلية الانفعال ومقاومة الشد القليلة في الخرسانة عالية المقاومة (HSC) يمكن معالجتها بإضافة الالياف الحديدية.

ونسبة الاملاح الكبريتية والامتصاص للركام الخشن هي 2.6 و 1593 و 0.08% و 0.68% على التوالي.

ومنحني الحمل – الاود، ومتانة الانثناء للعتبة الخرسانية المسلحة ذات المقطع على شكل T.

جدول (2) تدرج الركام الناعم

مقاس المنخل	النسبة المئوية المجمعة المحجوزة	النسبة المئوية المجمعة المارة	حدود المواصفة العراقية رقم 45 لسنة 1984 ضمن منطقة التدرج الثالثة
4.75-mm (No.4)	0	100	90-100
2.36-mm (No.8)	8.5	91.5	85-100
1.18-mm (No.16)	19.75	80.25	75-100
600-µm (No.30)	39.25	60.75	60-79
300-µm (No.50)	78.75	21.25	12-40
150-µm (No.100)	95.75	4.25	0-10

معامل النعومة = 2.42

جدول (3) تدرج الركام الخشن

مقاس المنخل	النسبة المئوية المجمعة المارة	حدود المواصفة الامريكية ASTM C33-01
12.5-mm	100	90-100
9.5-mm	90	85-100
4.75-mm	15	10-30
2.36mm	0	0-10

الماء

استخدم ماء الشرب الاعتيادي في الأعمال الخرسانية للبحث الحالي، كما تم استخدامه في معالجة النماذج.

الالياف

تم استخدام نوعين من الالياف. النوع الاول هو اليف البولي بروبيلين ذات المقطع المستطيل منتجة من قبل شركة (Fosroc) بطول 6mm، كما موضح في الشكل (1) وهي مقاومة للبيئة القلوية للخلطة الاسمنتية، غير ممغنطة، مقاومة للصدأ، خاملة كيميائيا، ولا تمتص الماء، وتنتشر بانتظام في الخلطة. هذه الالياف احادية الشعيرات صنعت مطابقة للمواصفة الامريكية (ASTM C1116-1997 Type III) [10].

والنوع الثاني هو اليف حديدية نوع (Dramix® ZP305) مصنوعة من قبل شركة (Bekaert) البلجيكية معقوفة عند النهايتين كما موضح في الشكل (2)، وتكون ملتصقة مع بعضها بواسطة غراء قابل للذوبان في الماء يذوب اثناء عملية الخلط وتنتشر الالياف في الخلطة الخرسانية. طول الالياف 30mm وقطرها 0.55mm (النسبة الباعية 55)، في هذا البحث تم اضافة الالياف بنسب حجمية (0.25%، 0.75%، 1.25%) من الحجم الكلي للخرسانة، بنسب خلط (0-100%) و (100-0%) و (50-50%) لكل من اليف البولي بروبيلين والالياف الحديدية على التوالي.

البرنامج العملي المواد المستخدمة الاسمنت

في هذا البحث تم استخدام اسمنت عراقي محلي نوع (كرسته) وهو اسمنت بورتلاندي اعتيادي، نتائج فحصه مطابقة للمواصفات القياسية العراقية (IQS No. 7/5/1984)، الخواص الكيميائية والفيزيائية لهذا الاسمنت موضحة في الجدول (1).

جدول (1) الخواص الكيميائية والفيزيائية للاسمنت

الاكاسيد	المحتوى %	حدود المواصفة العراقية رقم 5 لسنة 1984
CaO	62.3	-
Al ₂ O ₃	3.06	حد اعلى (8%)
SiO ₂	14.2	حد اعلى (21%)
Fe ₂ O ₃	-	حد اعلى (5%)
MgO	-	حد اعلى (5%)
SO ₃	2.25	حد اعلى (2.8%)
الفقدان اثناء الايقاد	0.93	حد اعلى (4%)
المواد غير الذائبة	0.89	حد اعلى (1.5%)
معامل الاشباع الجبري	0.9	(1.02 - 0.66)
الخواص الفيزيائية	نتائج الفحوصات	حدود المواصفة العراقية رقم 5 لسنة 1984
النعومة بطريفة بلين (m ² /kg)	301.5	لا تقل عن 230 m ² /kg
زمن التجمد بطريفة فيكات - الابتدائي (دقيقة : ساعة)	0:55	لا يقل عن 45 دقيقة
- النهائي (دقيقة : ساعة)	8:00	لا يزيد عن 10 ساعة
مقاومة الانضغاط (MPa) عند عمر - ثلاثة ايام	28.7	لا تقل عن 15

الركام الناعم

الركام الناعم المستخدم هو رمل نهري من منطقة الطوز وقد أجريت له عملية الغربلة، وتم استخدام الرمل المار من منخل رقم (4.75mm)، تدرج الرمل كما موضح في الجدول (2) مطابق للمواصفات القياسية العراقية (IQS No. 45/1984) [8] ضمن منطقة التدرج الثالثة. علما ان الوزن النوعي والكثافة الاجمالية المرصوفة ونسبة الاملاح الكبريتية ونسبة المواد الطينية والامتصاص للركام الناعم هي 2.6 ، 1590 kg/m³ ، 0.08% ، 1.3% و 2.2% على التوالي.

الركام الخشن

تم استخدام حصي نهري مدور ناعم متوفر في منطقة تكريت وأستخدم الحصى بمقاس أقصى يبلغ (M.A.S=12.5mm)، تم غسل الركام الخشن للتخلص من المواد الطينية، تدرج الحصى كما موضح في الجدول (3) مطابق للمواصفات الأمريكية ASTM C33-01 [9]، الوزن النوعي والكثافة الاجمالية المرصوفة

جدول (4) الفعالية البوزولانية والتحليل الكيميائي لمادة المايكرو سليكا

حدود المواصفة الامريكية ASTM C1240-03	التحليل الكيميائي للمادة		حدود المواصفة الامريكية ASTM C1240-03	الفعالية البوزولانية
	المحتوى %	الاكاسيد		
6% Max	3.89	L.O.I	حد ادنى %105	121.5 %
85% Min	91.03	SiO ₂		
-	4.02	Al ₂ O ₃		
-	0.32	Fe ₂ O ₃		
-	0.73	SO ₃		



شكل (1) اليف البولي بروبيلين

المدن الفائق

المضاف (Structuro 335) أستخدم في هذا البحث كمضاف مقل للماء بدرجة عالية (HAWRA) لتعزيز المقاومة المبكرة والنهائية، و كمدن فائق ذو تأثير فعال لإنتاج خرسانة سهلة الانسياب ذات قابلية تشغيل جيدة. لا يحتوي المضاف (Structuro 335) على الكلوريدات او اي مركبات تساعد على تآكل حديد التسليح. تم اضافة المدن الفائق بنسبة (3%) من وزن المواد الاسمنتية.

حديد التسليح

تم استخدام قضبان حديد التسليح الرئيسي بقطر (8mm) وللحلقات بقطر (6mm) وكذلك استخدمت قضبان التسليح بقطر (6mm) في الاتجاه الطولي في الجزء الاعلى من المقطع للمساعدة في تشكيل القفص الحديدي المطلوب. يبين الجدول (5) خصائص حديد التسليح المستخدم.



شكل (2) الالياف الحديدية

جدول (5) نتائج فحص حديد التسليح المستخدم

الاستطالة %	الاجهاد الاقصى (MPa)(f_u)	اجهاد الخضوع (MPa)(f_y)	القطر (mm)
7.5	736	626	8
6.5	717	672	6

نسب الخلط

نسب الخلط للخلطة الخرسانية المستخدمة في هذا البحث صممت بموجب مدونة معهد الخرسانة الامريكي (ACI 211.4R-08)[13]، للحصول على خرسانة عالية المقاومة ذات مقاومة انضغاط (f_c') مساوية الى (55 MPa) بعمر ثمانية وعشرون يوماً، حيث ان هذه المواصفة تقدم طرق عامة لاختيار نسب الخلط للخرسانة عالية المقاومة. تختص هذه الطرق بالخرسانة عالية المقاومة الحاوية على اسمنت بورتلاندي والرماد المتطاير وغبار السليكا وتنتج باستخدام المواد التقليدية. التخمين الاولي لكمية ماء الخلطة في الخرسانة المرجعية (reference concrete (Ref)) تم احتسابه بموجب مدونة معهد الخرسانة الامريكي (ACI 211.4R-08)، ثم اجريت عدة خلطات تجريبية في المختبر بتغيير محتوى كمية الماء للحصول على هطول بمقدار (100mm±5) لأنه يعطي قابلية تشغيل جيدة للخلطة عند اضافة الالياف.

غبار السليكا

غبار السليكا المستخدم في هذا البحث هو مايكرو سليكا (micro silica) نوع (MEYCO® MS610). تنتج المايكرو سليكا كنتاج عرضي من صناعة السليكون، وهي انعم بمائة مرة من السمات البورتلاندي، وعندما تستخدم في الخرسانة تستخدم كمادة مألثة وكما مادة اسمنتية، حيث ان الدقائق الصغيرة للمايكرو سليكا تملأ الفراغات بين دقائق الاسمنت وبين الاسمنت والركام، وتتفاعل المايكرو سليكا كذلك مع هيدروكسيد الكالسيوم الناتج من عملية اماهة الاسمنت لتشكل سليكات كالسيوم اضافية خلال التفاعل، وبالتالي تنتج خرسانة اكدف واقوى واقل نفاذية[11]. المايكرو سليكا نوع خاص من غبار السليكا ذو جودة عالية، ومصادق عليه كمضاف للخرسانة حسب المواصفة الامريكية (ASTM C1240-03)[12]. يوضح الجدول (4) نتائج فحص الفعالية البوزولانية والتحليل الكيميائي لهذا النوع من غبار السليكا. تم اضافة المايكرو سليكا بنسبة (10%) من وزن الاسمنت كاستبدال جزئي للاسمنت.

فحوصات الخرسانة المتصلية

فحص مقاومة الانضغاط

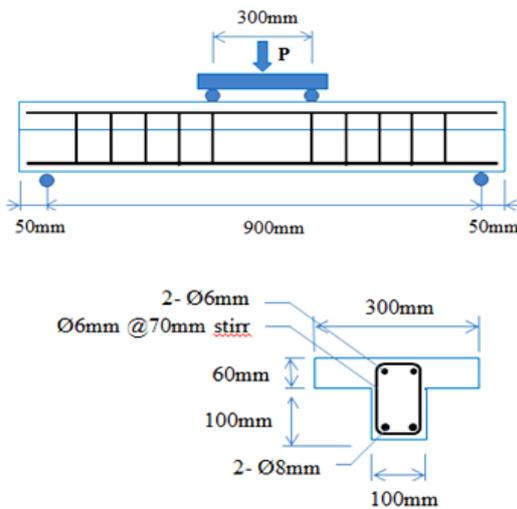
تم فحص مقاومة الانضغاط حسب المواصفة البريطانية (BS 1881: part 116:1989) [15] للنماذج المكعبة الشكل (150×150×150mm)، حيث تم تحميلها باتجاه احادي المحور باستخدام ماكينة فحص كهربائية نوع (wekob) ذات سعة 2500 kN، بحيث يكون الحمل مسلطاً على وجهين متقابلين من الوجة الجانبية للمكعب والتي تكون متعامدة مع اتجاه صب النموذج. تم اعتماد معدل مقاومة الانضغاط لثلاث مكعبات بعمر 28 يوم محسوبة من لحظة اضافة ماء الخلط الى مكونات الخرسانة لكل نوع من انواع الخلطات الخرسانية المختلفة.

فحص مقاومة شد الانشطار

تم فحص مقاومة شد الانشطار حسب المواصفة الامريكية (ASTM C 496-96) [16]. وقد اجري الفحص على نماذج خرسانية اسطوانية الشكل بعمر 28 يوم ذات ابعاد قياسية (150×300mm)، لكل خلطة تم اعتماد معدل نتائج فحص ثلاثة نماذج خرسانية اسطوانية.

فحص مقاومة الانثناء للعتبة الخرسانية المسلحة ذات المقطع T

كافة العتبات الخرسانية التي تم فحصها في هذا البحث ذات مقطع على شكل T ومصبوبة مرة واحدة من نفس النوع من الخرسانة بدون اي مفصل انشائي بين الشفة، والوتر. الشكل (3) يوضح كافة ابعاد المقطع للعتبة الخرسانية بطول كلي (1000mm) والمسافة الصافية بين دعائمي الاسناد (clear span) هي (900mm). هذه العتبات الخرسانية كانت بسيطة الاسناد وعُرضت للحمل في نقطتين بمسافة (200mm) بين نقطتي التحميل.



الشكل (3) مخطط تفصيلي للعتبة الخرسانية ذات المقطع T ونقاط التحميل

يوضح الجدول (6) الكميات الوزنية للمواد المستخدمة في تحضير الخلطة الخرسانية في هذا البحث، بعد ذلك تم اضافة الالياف بنسبة حجمية (0.25% ، 0.75% ، 1.25%) من الحجم الكلي للخرسانة، بنسب خلط (0-100%) و (100-0%) و (50-50%) لكل من ألياف البولي بروبيلين والالياف الحديدية على التوالي.

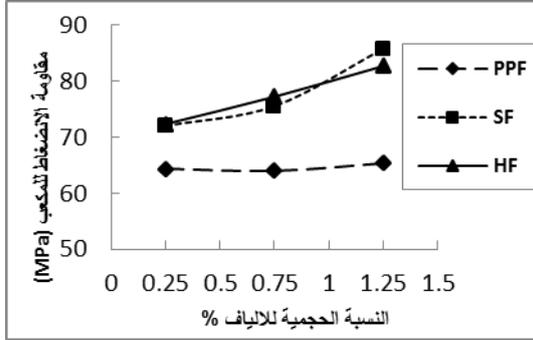
جدول (6) نسب الخلط في الخرسانة المرجعية (الخالية من الالياف)

مكونات الخلطة	الماء	السمنت	الركام الناعم	الركام الخشن	غبار السليكا	الملدن الفائق
الكمية kg/m ³	152	360	850	980	40	12

الخلط والصب والمعالجة

تنظف قوالب الصب جيداً ثم تدهن القوالب من الداخل بطبقة من الزيت لتسهيل تفكيكها وإخراج القوالب منها بعد الصب ثم يوضع هيكل التسليح الحديدي داخل قالب العتبة الخرسانية ذات المقطع T، بعد ذلك تبدأ عملية التحضير للخلطة الخرسانية بوزن كميات المواد المطلوبة للخليط ثم تبدأ عملية الخلط بإضافة نصف الركام الخشن ونسبة قليلة من الماء الى الخليط اولاً. ثم تضاف الالياف بنوعها (الياف البولي بروبيلين والالياف الحديدية) الى الخليط وهي تدور وتتم عملية اضافة الالياف بالتدريج وبصورة بطيئة لتجنب تكورها وتجمعها بعدها تستمر عملية الخلط لمدة دقيقة واحدة على الأقل، ثم تضاف نصف كمية الركام الناعم ونصف كمية المواد الاسمنتية (يخلط الاسمنت وغبار السليكا قبل بدء عملية الخلط) وتستمر عملية الخلط لمدة دقيقة واحدة، ثم تضاف نصف كمية الماء وكل كمية الملدن الفائق الى الخليط ويستمر الخلط لمدة دقيقتين، ثم تضاف المواد المتبقية (نصف الركام الخشن والركام الناعم ونصف المواد الاسمنتية) وتضاف كمية الماء المتبقية الى الخليط وهي تدور وتستمر عملية الخلط لمدة ثلاث دقائق اخرى. بعد ذلك يجري فحص الهطول على الخرسانة الطرية مع الاخذ بنظر الاعتبار الحفاظ على مقدار الهطول بحدود (50-100 mm) بزيادة كمية الملدن الفائق كلما كان مقدار الهطول اقل من (50 mm) حيث ان اضافة الالياف تؤدي الى تقليل قابلية التشغيل، ثم تملأ القوالب بالخرسانة الطرية وترص باستخدام قضيب معدني بقطر (22 mm) حيث تملأ القوالب على طبقات سمك الطبقة الواحدة (50 mm) [14]. تترك كافة النماذج في جو المختبر لمدة (24) ساعة بعدها يتم استخراج النماذج بفتح القوالب وتوضع في احواض الماء لمدة 27 يوم ثم تخرج لكي تكون جاهزة للفحص. العدد الكلي للخلطات هو عشرة خلطات خرسانية استخدمت في تحضير العتبات والنماذج الخرسانية الاخرى. لكل خلطة تم صب ثلاثة عتبات بشكل T وثلاثة مكعبات قياسية بأبعاد (150×150×150mm) وثلاثة اسطوانات قياسية بأبعاد (150×300 mm) وبهذا يكون عدد النماذج الي تم صبها ثلاثون عتبة وثلاثون مكعب وثلاثون اسطوانة.

الماكينة. فعندما تتعرض الخرسانة الى اجهاد انضغاط محوري يحصل انفعال انضغاط محوري وانفعال شد جانبي عمودي على اتجاه قوة الانضغاط، يزداد الانفعال بزيادة الحمل المسلط وتتشكل التشققات المجهرية في مستوي موازي لاتجاه الحمل المسلط، تنمو وتتوسع هذه التشققات ويحصل الفشل.



الشكل (4) تأثير الياق البولي بروبيلين والالياف الحديدية والياق الحديد والبولي بروبيلين الهجينة على مقاومة الانضغاط بنسب حجمية (V_f) مختلفة

كافة الفحوصات اجريت باستخدام ماكينة الفحص (universal testing machine SANS) (5000kN)، بسرعة تحميل (1.5mm في الدقيقة) مقدار الحمل تم قياسه باستخدام خلية تحميل (load cell)، ومقدار الاود تم قياسه باستخدام عداد رقمي (digital dial gage) ذو سعة (15mm) وبدقة (0.01mm) يثبت تحت الوجه الاسفل في منتصف فضاء العتبة الخرسانية، وقد تم اعتماد معدل نتائج فحص ثلاثة عتبات لكل نوع من انواع الخلطات الخرسانية المختلفة بعمر 28 يوم ومعدل منحنيات الحمل - الاود الناتجة من فحص هذه العتبات الثلاث تم توحيدها في منحنى واحد.

النتائج والمناقشة مقاومة الانضغاط

معدل نتائج فحص مقاومة الانضغاط لثلاثة مكعبات بعمر 28 يوم لكافة الخلطات الخرسانية موضحة في الجدول (7) والشكل (4). إن الفشل في الخرسانة نتيجة فحص مقاومة الانضغاط للمكعب نادرا ما يكون بسبب إجهادات الانضغاط فقط بل يتأثر بإجهادات الاحاطة الجانبية الواقعة عليه من احتكاك نهايته مع سطحي

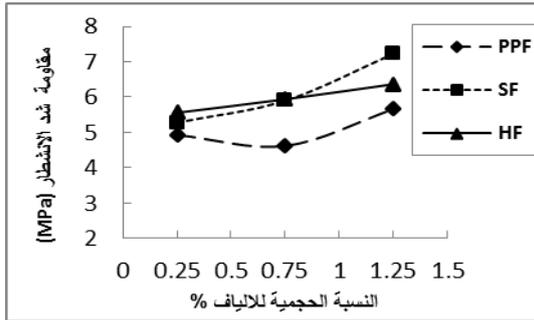
جدول (7) نتائج فحص مقاومة الانضغاط ومقاومة شد الانشطار

مقاومة الانضغاط للمكعب بعمر 28 يوم (MPa)	مقاومة شد الانشطار بعمر 28 يوم (MPa)	غبار السليكا %	SP %	w/c	الياف		الخلطات الخرسانية	المجموعة
					% PPF	% SF		
68.89	5.12	10	3	0.38	0	0	M1	Ref
64.37	4.39	10	3	0.38	100	0	M2	G1
64	4.62	10	3	0.38	100	0	M3	
65.34	5.66	10	3.2	0.38	100	0	M4	
72	5.28	10	3.125	0.38	0	100	M5	G2
75.55	5.9	10	3.25	0.38	0	100	M6	
85.78	7.32	10	3.44	0.38	0	100	M7	
72.34	5.56	10	3	0.38	50	50	M8	G3
77.22	5.94	10	3.125	0.38	50	50	M9	
82.7	6.73	10	3.2	0.38	50	50	M10	

التوالي، تعزى هذه النتائج الى زيادة محتوى الهواء (air content) والحجم الكبير للفراغات التي تظهر في الخرسانة عند إضافة الياق البولي بروبيلين. اما الخلطات الخرسانية (M7، M6، M5) التي تحتوي على نسب حجمية مختلفة من الالياف الحديدية (SF). ومن خلال النتائج المختبرية نلاحظ إن مقاومة انضغاط الخرسانة تزداد نتيجة إضافة الالياف الحديدية بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية. كانت نسبة الزيادة في مقاومة انضغاط الخرسانة للمكعب هي (4.5%)، (9.6%)، (24.5%) نتيجة إضافة الالياف الحديدية بنسب حجمية (0.25%)، (0.75%)، (1.25%) على التوالي، والسبب في ذلك يعود الى ان معامل المرونة للالياف الحديدية اعلى من معامل مرونة الخرسانة.

في الخلطات الخرسانية (M4، M3، M2) التي تحتوي على نسب حجمية مختلفة من الياق البولي بروبيلين (PPF). نلاحظ تغيرا طفيفا في مقاومة انضغاط الخرسانة نتيجة إضافة هذا النوع من الالياف بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية. السبب في ذلك يعود الى أن معامل المرونة للالياف البولي بروبيلين اقل من معامل المرونة للخرسانة المتصلبة. وبالتالي فان الالياف لا تساهم في مقاومة الاحمال حتى تتشقق الخرسانة. إضافة الياق البولي بروبيلين يسبب انخفاض في معدل مقاومة الانضغاط بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية. نسبة الانخفاض في مقاومة انضغاط الخرسانة هي (6.56%)، (7.1%)، (5.15%) نتيجة إضافة الياق البولي بروبيلين بنسب حجمية (0.25%)، (0.75%)، (1.25%) على

الزيادة تكون عالية نسبياً بزيادة النسبة الحجمية ويعود السبب في ذلك أيضاً إلى كفاءة الألياف الحديدية معقوفة النهايات في تجسير التشققات. من خلال النتائج المختبرية نلاحظ إن استخدام الألياف الهجينة في الخرسانة عالية المقاومة له تأثير واضح في زيادة مقاومة شد الانشطار، هذه الزيادة تتناسب طردياً مع زيادة النسب الحجمية للألياف حيث كانت نسبة الزيادة في مقاومة شد الانشطار القصوى بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية هي (8.6%، 16%، 24.4%) عند استخدام الألياف الهجينة بالنسب الحجمية (0.25%، 0.75%، 1.25%) على التوالي.



الشكل (5) تأثير الألياف البوليمرية والبوليمرية والحديدية والألياف الحديدية على مقاومة شد الانشطار بنسب حجمية مختلفة (V_f)

سلوك العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع T في الانثناء

كافة العتبات الخرسانية صممت لتفشل في الانثناء. يبدأ ظهور التشققات في منطقة إجهادات الشد ($tension$ zone) في الجزء الأسفل من العتبة (الوتر) وعلى امتداد المسافة بين نقطتي التحميل التي يكون فيها العزم ثابتاً. يرافق ذلك إزاحة محور التعادل (neutral Axis) إلى الأعلى باتجاه منطقة الانضغاط (compression zone)، وبزيادة التحميل تصل قضبان التسليح إلى مرحلة الخضوع وبالتحميل أكثر يحدث فشل انضغاط الخرسانة في الجزء العلوي من العتبة (الشفة).

يوضح الجدول (8) نتائج فحص الانثناء لكافة العتبات الخرسانية ذات المقطع T، مثل حمل التشقق (P_{cr})، الأود عند أول شق (δ_{cr})، حمل الخضوع (P_y)، الأود عند الخضوع (δ_y)، الحمل الأقصى (P_u)، الأود الأقصى (δ_u)، وكذلك مؤشر المطيلية (μ_d) والذي يساوي النسبة بين الأود الأقصى والأود عند خضوع قضبان حديد التسليح. من خلال هذه النتائج يمكن ملاحظة إن حمل التشقق في كافة العتبات الخرسانية يعتمد على مقاومة الخرسانة القصوى للشد ولذلك نلاحظ أن النتائج العملية لحمل التشقق في فحص الانثناء تتناسب مع النتائج العملية لفحص مقاومة شد الانشطار. يوضح الشكل (6) منحنيات الحمل – الأود لكافة العتبات الخرسانية، في الخرسانة المرجعية يكون هذا المنحنى خطياً لحد ظهور الشق الأول، ثم يبدأ الجزء الثاني في مرحلة ما بعد التشقق الذي

إن إضافة الألياف تساهم في زيادة مقاومة الانضغاط بشكل ملحوظ من خلال اشتراك الألياف الحديدية الموازية لمحور تسليط الحمل في تحمل الحمل المسلط مع الخرسانة، ومن خلال حجز التشققات، فعندما تقاوم المكعبات الخرسانية حمل انضغاط متزايد يزداد انفعال الشد الجانبي ومن ثم تبدأ التشققات وتستمر في التطور والتقدم، وبسبب إجهادات الشد يبدأ ظهور سطح عدم ترابط الألياف مع الخرسانة (de bonding interface)، عندما يصل الشق المتقدم إلى هذا السطح يتعرض رأس الشق إلى عملية تلم (process blunting) وبالتالي يقل تركيز الإجهاد في رأس الشق، وهكذا يمنع تقدم الشق إلى الأمام ويحول اتجاهه، أخيراً وبزيادة التحميل يحدث انسحاب الألياف (fiber pullout) عندما تصل مقاومة ترابط الألياف والخرسانة إلى حددها الأقصى ويحدث الفشل، في حالة الألياف معقوفة النهايات كالألياف المستخدمة في الدراسة الحالية تزداد مقاومة الترابط إلى حد كبير.

دمج النوعين السابقين من الألياف أو ما يسمى بالألياف الهجينة (HF) بنسبة (50% PPF ، 50% SF) كان له تأثير واضح في تحسين مقاومة الانضغاط بزيادة النسبة الحجمية للألياف الحديدية والبوليمرية الهجينة، إن دمج الألياف البوليمرية الدقيقة وذات معامل المرونة الواطئ نسبياً مع الألياف الحديدية الطويلة وذات معامل المرونة العالي أدى إلى زيادة في مقاومة انضغاط الخرسانة بنسبة (5%، 12%، 20%) عند النسب الحجمية (0.25%، 0.75%، 1.25%) على التوالي بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية، بسبب تداخل تأثير الألياف البوليمرية في تقليل تشققات الانكماش وتأثير الألياف الحديدية في حجز التشققات.

مقاومة شد الانشطار

معدل نتائج فحص مقاومة شد الانشطار بعمر 28 يوم لكافة الخلطات الخرسانية موضحة في الجدول (7) والشكل (5). في الخرسانة المرجعية الخالية من الألياف تبلغ مقاومة شد الانشطار (7.43%) من مقاومة الانضغاط. إن معامل مرونة الألياف البوليمرية أقل من معامل مرونة الخرسانة ولذلك فإن الألياف لا تساهم بشكل فعال في مقاومة إجهادات الشد حتى التشقق، ولما كانت هذه الألياف تعمل على زيادة محتوى الهواء والفراغات في الخرسانة كانت نتائج فحص شد الانشطار عند إضافة هذا النوع من الألياف بنسب حجمية (2.5% ، 7.5%) منخفضة بنسبة (3.7% ، 9.8%) على التوالي بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية. أما عند النسبة الحجمية (1.25%) فقد ازدادت مقاومة شد القصوى بنسبة (10.5%) بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية.

الألياف الحديدية تساهم في مقاومة إجهادات الشد مع الخليط الخرساني بسبب معامل مرونتها العالي (أعلى من معامل مرونة الخرسانة) مما يؤدي إلى تحسين مقاومة الشد عند إضافة هذه الألياف إلى الخرسانة بمختلف النسب الحجمية. نتائج فحص مقاومة الانشطار للخرسانة المسلحة بالألياف الحديدية بنسب حجمية (0.25%، 0.75% ، 1.25%) تزيد بنسبة (3% ، 15% ، 43%) على التوالي بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية، حيث نلاحظ أن

التي يزداد فيها الاود بدرجة ملحوظة، حتى الوصول الى الحمل الاقصى ثم مرحلة الفشل الذي كان في هذه العتبة فشل انضغاط في الخرسانة في الجزء العلوي من العتبة الخرسانية.

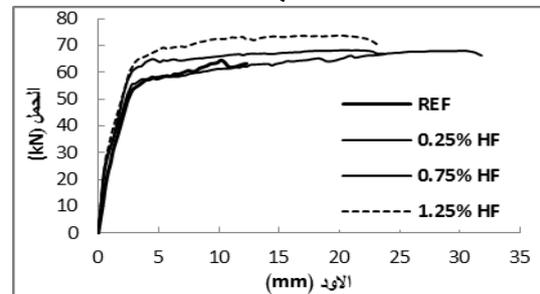
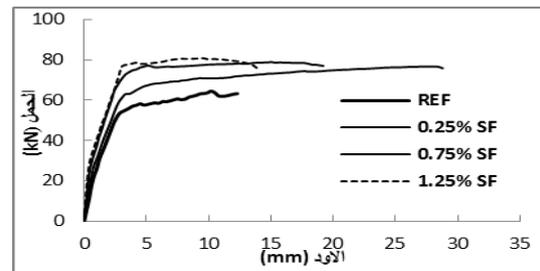
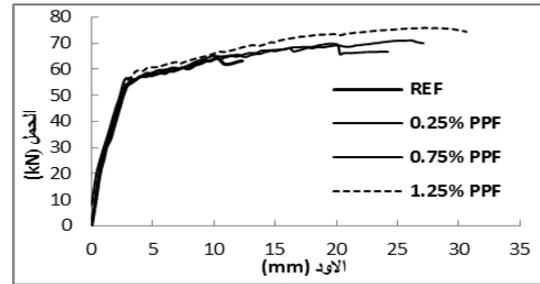
يكون خطيا تقريبا واقل ميلا من الجزء الاول بسبب فقدان جزء من صلابة العتبة (stiffness) نتيجة التشققات. تنتهي مرحلة ما بعد التشقق عند نقطة خضوع حديد التسليح لتبدأ مرحلة جديدة هي مرحلة ما بعد الخضوع

جدول (8) نتائج فحص الانشاء للعتبات الخرسانية ذات المقطع T

مؤشر المطيلية ($\mu_d = \delta_u / \delta_y$)	الود (mm)			(P_u) (kN)	(P_y) (kN)	(P_{cr}) (kN)	% V_f	العتبات الخرسانية	المجموعة
	(δ_u)	(δ_y)	(δ_{cr})						
3.78	10.2	2.7	0.6	64.5	54	21.5	0	B1	Ref
6.5	19.5	3	0.75	69.75	56	21.5	0.25	B2	G1
8.55	26.5	3.1	0.6	71.1	56	20.5	0.75	B3	
8.8	28.2	3.2	0.65	75.76	56	22	1.25	B4	
8.45	27.9	3.3	0.65	76.7	61	25	0.25	B5	G2
4.84	15	3.1	0.45	78.97	72	26	0.75	B6	
3.2	9.6	3	0.4	80.83	77	29	1.25	B7	
10.7	30	2.8	0.5	67.97	56	24	0.25	B8	G3
6.66	21.3	3.2	0.55	68.23	61	24	0.75	B9	
6.39	19.8	3.1	0.6	73.7	64	28	1.25	B10	

ان تأثير اضافة اليف البولي بروبيلين على الحمل الاقصى في الانشاء يكون قليلا، حيث يزداد الحمل الاقصى بزيادة النسبة الحجمية لألياف البولي بروبيلين، هذه الزيادة سببها تأثير اليف البولي بروبيلين في مرحلة ما بعد التشققات حيث تعمل على تجسير التشققات وبسبب قابليتها العالية على الانفعال وترابطها الجيد مع المزيج الخرساني، تؤدي الى زيادة الحمل الاقصى في الانشاء مع زيادة ملحوظة في الود المسجل عند اقصى حمل (δ_u). ان اضافة اليف البولي بروبيلين يؤدي الى زيادة ملحوظة في مؤشر المطيلية (μ_d) في العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع T بزيادة النسبة الحجمية لهذه الالياف، وله تأثير قليل على منحنى الحمل - الود في مرحلة التحميل الاولى لحد حدوث الشق الاول ومرحلة التحميل الثانية لحد خضوع قضبان حديد التسليح، يظهر تأثير اضافة اليف البولي بروبيلين بوضوح في مرحلة ما بعد خضوع قضبان حديد التسليح حيث يزداد الحمل الاقصى (P_u) والود الاقصى (δ_u) بزيادة النسبة الحجمية (V_f) لهذه الالياف كما موضح في الشكل (6-أ)، وذلك لان انفعال الفشل في اليف البولي بروبيلين اعلى من انفعال الفشل في المزيج الخرساني.

في المجموعة الثانية (G2) يزداد الحمل الاقصى في الانشاء نتيجة اضافة الالياف الحديدية الى الخلطات الخرسانية، حيث ان زيادة النسبة الحجمية للألياف الحديدية (V_f) تؤدي الى زيادة كبيرة في الحمل الاقصى. بسبب كون الالياف الحديدية اكثر صلابة من اليف البولي بروبيلين، وبما ان معامل مرونة الالياف الحديدية اعلى من معامل مرونة الخرسانة تساهم الالياف في مقاومة اجهادات الشد قبل وبعد التشقق كما تعمل على زيادة مقاومة الانضغاط للمادة المركبة (الخرسانة + الالياف



الشكل (6) منحنى الحمل - الود للعتبة الخرسانية المسلحة ذات المقطع T والمعززة بأنواع ونسب حجمية مختلفة من الالياف

اعلى نسبة زيادة هي (17.46%) عند النسبة الحجمية (1.25%) للألياف البولي بروبيلين. كذلك يزداد الحمل الأقصى في الانتشاء في العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع T والمعززة بالألياف الحديدية، وكانت اعلى نسبة زيادة بالمقارنة مع العتبة المرجعية (الخالية من الالياف) هي (25.3%) عند النسبة الحجمية (1.25%) للألياف الحديدية، أما في العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع T والمعززة بالألياف الهجينة فان الزيادة في الحمل الأقصى في الانتشاء تكون اقل منها في حالة استخدام كل من النوعين بشكل منفرد، وكانت اعلى نسبة زيادة بالمقارنة مع العتبة المرجعية (الخالية من الالياف) هي (14.26%) عند النسبة الحجمية (1.25%) للألياف الهجينة.

4- اضافة الالياف بمختلف انواعها تعمل على تحسين المطيلية في العتبة الخرسانية المسلحة ذات المقطع T، يزداد هذا التحسن بزيادة النسبة الحجمية للألياف البولي بروبيلين بسبب قابلية الانفعال العالية لهذا النوع من الالياف ويقل بزيادة النسبة الحجمية للألياف الحديدية والالياف الهجينة بسبب صلابة الالياف الحديدية ذات معامل المرونة العالي نسبيا. كانت اعلى قيمة لمؤشر المطيلية (μ_a) بمقدار (10.7) عند النسبة الحجمية (0.25%) للألياف البولي بروبيلين والحديد الهجينة.

المصادر

- 1- Suprenant, B. A., and Malisch, W.R., "The Fiber Factor", Concrete Construction, Addison, Illinois, pages 43 to 46, October 1999.
- 2- Romualdi, J. P., and Mandel, J. A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", ACI Journal, Proceeding, Vol. 61, No. 6, pp. 657-671, June 1964.
- 3- Song, P.S., and Hwang, S., "Mechanical Properties of High-strength Steel Fiber-Reinforced Concrete", Construction and Building Materials, Volume 18, Issue 9, pp. 669-673, November 2004.
- 4- Bei-xing, L., Ming-xian, C., Fang, C and ping, L., "The Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete", Journal of Wuhan University of Technology, Vol. 19, No. 3, September 2004.
- 5- Yao, Li, W., and Wu, K., "Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume

الحديدية). كما تعمل الالياف الحديدية على زيادة مؤشر المطيلية، وتقل هذه الزيادة بزيادة النسبة الحجمية لهذه الالياف. وبما أن الالياف الحديدية لها تأثير كبير في تحسين مقاومة الانضغاط ومعامل المرونة ومقاومة الشد في الخرسانة عالية المقاومة، نلاحظ إن اضافة هذه الالياف بمختلف النسب الحجمية لها تأثير واضح على منحنى الحمل - الأود في كافة مراحل التحميل كما موضح في الشكل (6-ب).

اما عند استخدام الياف البولي بروبيلين والحديد الهجينة فان هناك زيادة ملحوظة في مقاومة الانتشاء خلال مراحل التحميل وخاصة الأولية منها ولكن الزيادة في الحمل الأقصى في الانتشاء تكون اقل منها في حالة استخدام كل من النوعين بشكل منفرد وذلك بسبب كون هذه الالياف تحسن مقاومة الانتشاء في مراحل مختلفة، فالألياف الحديدية الصلبة تزيد مقاومة الانتشاء عندما يكون الأود قليلا، اما الياف البولي بروبيلين المرنة فأنها تساهم في تحسين مقاومة الانتشاء في المراحل المتأخرة عند زيادة الأود في العتبة الخرسانية. يوضح الشكل (6-ج) تأثير الالياف الهجينة بمختلف النسب الحجمية على منحنى الحمل - الأود، حيث يتداخل تأثير كلا النوعين في المساهمة في مقاومة اجهادات الانضغاط والشد قبل وبعد حدوث التشقق وكذلك بعد خضوع حديد التسليح.

الاستنتاجات

- 1- إن اضافة الياف البولي بروبيلين تؤدي الى انخفاض طفيف في مقاومة الانضغاط في الخرسانة عالية المقاومة. اما اضافة الالياف الحديدية فإنها تؤدي الى تحسن ملحوظ في مقاومة انضغاط الخرسانة عالية المقاومة وتزداد مقاومة الانضغاط بزيادة النسبة الحجمية للألياف الحديدية. وكانت اعلى نسبة زيادة بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية (الخالية من الالياف) هي (24.5%) عند النسبة الحجمية (1.25%) للألياف الحديدية. اما اضافة الياف البولي بروبيلين والحديد الهجينة فإنها تؤدي الى تحسين مقاومة الانضغاط بانخفاض طفيف عن افضل النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام الالياف الحديدية فقط.
- 2- تنخفض مقاومة شد الانتشار في الخرسانة عالية المقاومة المسلحة بألياف البولي بروبيلين انخفاض طفيف عنها في الخرسانة المرجعية عند النسب الحجمية الواطئة (0.25%، 0.75%) وترتفع قليلا عند النسب الحجمية العالية (1.25%)، اما مقاومة شد الانتشار في الخرسانة المسلحة بالألياف الحديدية فإنها تتحسن بدرجة كبيرة ويزداد هذا التحسن بزيادة النسبة الحجمية للألياف الحديدية، اعلى نسبة زيادة بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية بلغت (43%) عند النسبة الحجمية (1.25%) في حالة الخرسانة المسلحة بالألياف الهجينة على الرغم من انخفاض كمية الالياف الحديدية الى النصف بالمقارنة مع الخرسانة المسلحة بالألياف الحديدية عند نفس النسب الحجمية فان الزيادة في مقاومة شد الانتشار كانت متقاربة في كلتا الحالتين.
- 3- الحمل الأقصى في الانتشاء يزداد في العتبات الخرسانية المسلحة ذات المقطع T والمعززة بألياف البولي بروبيلين بالمقارنة مع الخرسانة المرجعية، وكانت

- 12- ASTM C1240-03, "Standard Specification for Use of Silica Fume as a Mineral Admixture in Hydraulic-Cement Concrete, Mortar, and Grout".
- 13- ACI Committee 211, "Guide for Selecting Proportions For High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementations Materials" ACI 211.4R-08, American Concrete Institute, 2008.
- 14- هناء عبد يوسف، "فحوصات في تكنولوجيا الخرسانة"، الجامعة التكنولوجية، صفحة 67، 1990.
- 15- BS 1881, Part 116, "Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes", British Standards Institution, PP. 3, 1989.
- 16- ASTM C 496 – 96, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
- Fraction", Cement and Concrete Research, No. 33, pp. 27-30, 2003.
- 6- Abdul-Ahad, R.B., and Aziz, O.Q., "Flexural Strength of Reinforced Concrete T-Beams with Steel Fibers", Building and Construction Department, University of Technology, Iraq, Cement and Concrete Composites, Volume 21, Issue 4, pp. 263-268, August 1999.
- 7- المواصفة القياسية العراقية رقم (5)، "الاسمنت البورتلاندي"، الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية، المواصفة القياسية العراقية، بغداد، 1984.
- 8- المواصفة القياسية العراقية رقم (45)، "ركام المصادر الطبيعية المستعمل في الخرسانة والبناء"، الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية، بغداد، 1984.
- 9- ASTM C 33-01, "Standard Specification for Concrete Aggregates".
- 10- ASTM C1116-97, "Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shot Crete".
- 11- Khader A., "Evaluation of the Constructability & Performance of Micro-Silica Modified Concrete Bridge Deck Overlays", Wisconsin Department of Transportation, Report No.10, December 2003.