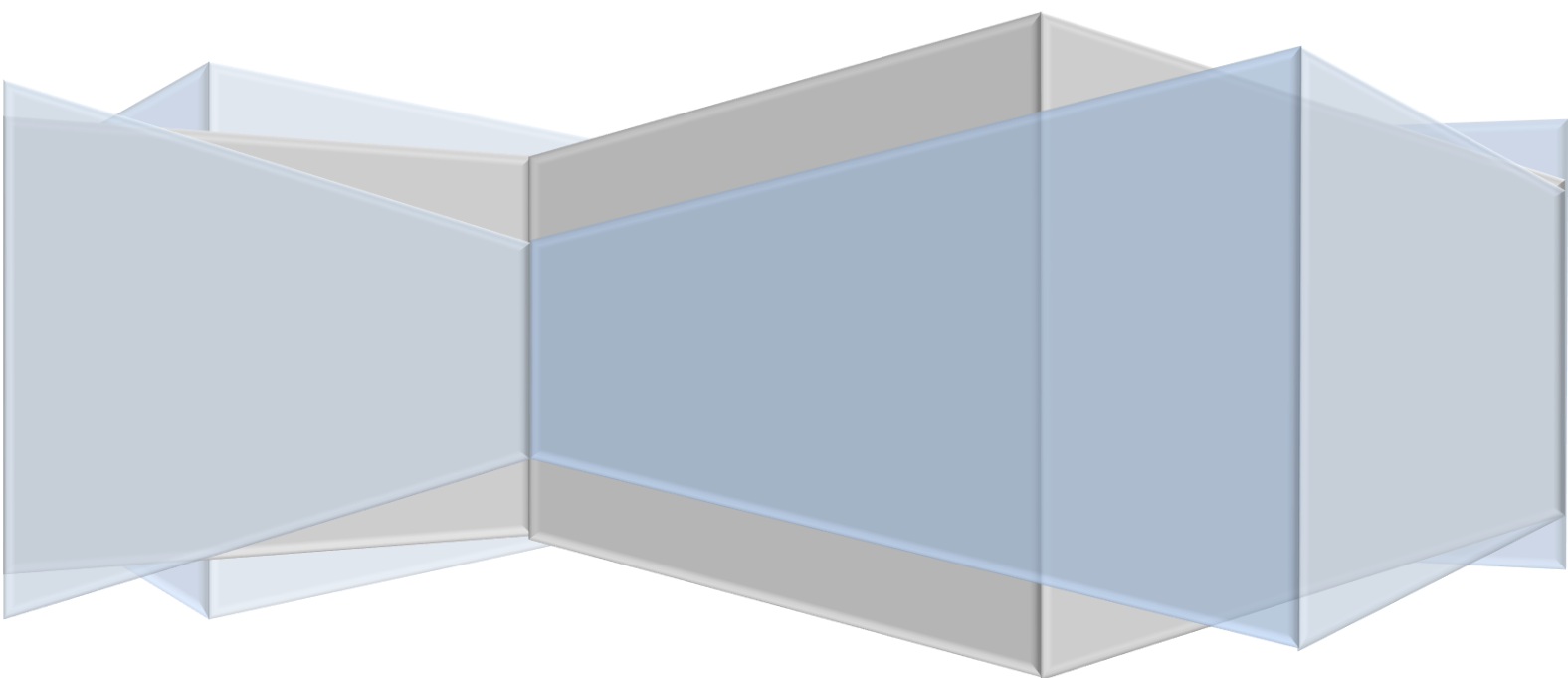


# الفصل الثاني

## الخرسانة الليفية

### والدراسات السابقة



## الفصل الثاني

### الخرسانة الليفية و الدراسات السابقة

#### Introduction

#### ١,٢ مقدمة

خرسانة السمنت البورتلاندي تعتبر مادة هشة (Brittle) عند تعرضها لإجهادات الشد ولو بمقدار قليل، حيث إن الخرسانة غير المسلحة تتشقق وتفشل تحت تلك الإجهادات ، ومنذ منتصف القرن الثامن عشر أستخدم حديد التسليح لحل هذه المشكلة حيث بإستعماله في الخرسانة كمادة مركبة يقوم حديد التسليح بمقاومة جميع إجهادات الشد<sup>(٣)</sup> .

الخرسانة الحاوية على السمنت المائي (Hydraulic cement) ، الماء، ركام ناعم وخشن وألياف منفصلة غير مستمرة تدعى بالخرسانة الليفية (Fiber Reinforced Concrete) أو (FRC) . ولتحسين قابلية تشغيل الخلطة لهذه الخرسانة تُضاف مواد كيميائية تُدعى بالملدنات (Superplasticizers). إكتسبت الخرسانة الليفية إنتشاراً واسعاً في إنشاء السقوف ، رصف الطرق ، أسس المكائن ،الأبنية ضد الزلازل ، الخرسانة مسبقة الصب وخرسانة الرش (Shotcrete) ....ألخ<sup>(٤)</sup>.

السبب الرئيسي لإضافة الألياف الى الخرسانة هو لزيادة المتانة (Toughness) ،مقاومة الشد وتحسين خاصية التشقق للمزيج الناتج. ولكي تكون الخرسانة الليفية مادة ناجحة يجب أن تُحقق متطلبات الإقتصادية والكفاءة بالوقت ذاته .

تُصنع الألياف من الفولاذ ،البلاستيك ،الزجاج ،أو ألياف طبيعية وتتوفر بأشكال وأحجام وأقطار ومقاطع مختلفة تتراوح أطوالها بين (٦-١٥٠) ملم (٠,٢٥-٦) إنج ، وبسمك يتراوح بين (٠,٠٠٥-٠,٧٥) ملم (٠,٣-٠,٠٠٢) إنج وتُضاف للخرسانة أثناء الخلط .

ومن أهم العوامل التي تؤثر على أداء الخرسانة الليفية هي<sup>(٥)</sup> :-

١. الخصائص الفيزيائية للخرسانة وللألياف المضافة إليها.

٢. مدى الترابط بين الألياف والخرسانة.

وعلى الرغم من كون حديد التسليح الإعتيادي والألياف يؤديان الغرض ذاته إلا ان هناك بعض الاختلافات أهمها<sup>(٥)</sup>:-

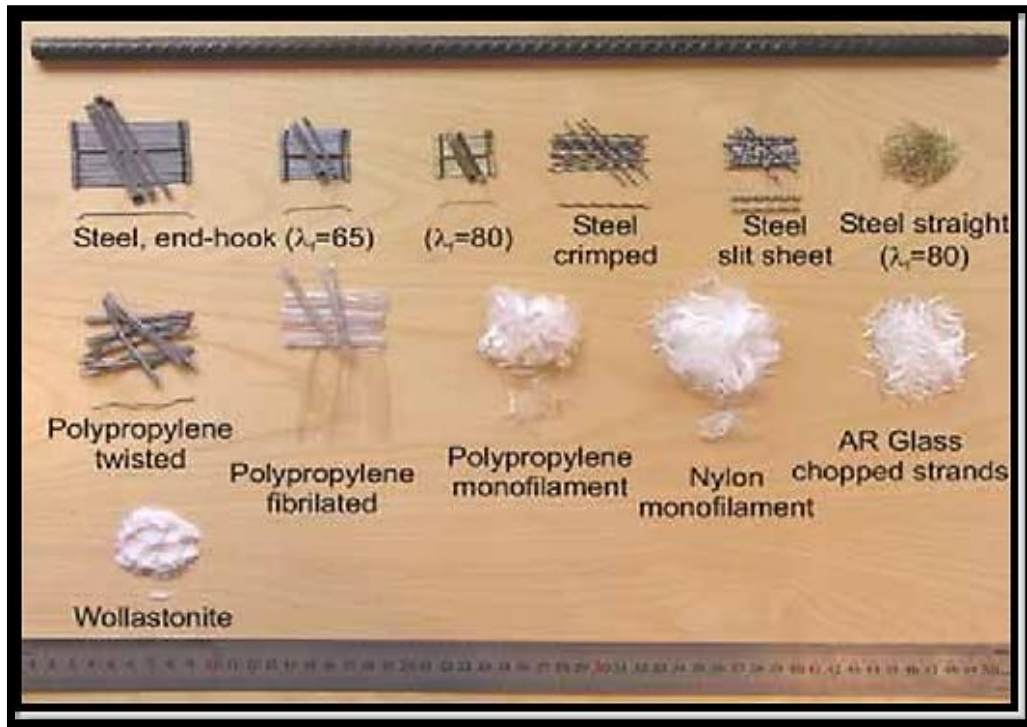
١. تنتشر الألياف خلال المقطع بكامله على عكس قضبان التسليح او المشبكات التي توضع في المكان المطلوب فقط.

٢. معظم الألياف قصيرة نسبياً ومتقاربة من بعضها (المسافة بينها قليلة) مقارنة بالتسليح الإعتيادي أو المشبكات.

بصورة عامة لا يمكن الحصول على مساحة تسليح بالألياف ضمن مقطع الخرسانة مماثلة لتلك التي باستخدام حديد التسليح الإعتيادي أو باستخدام المشبكات السلكية .

## ٢,٢ أنواع الألياف *Types of Fiber*

هناك عدد كبير من الألياف التي تُستخدم لتحسين المتانة (*Toughness*) وخصائص أخرى للخرسانة، ألياف الفولاذ أستخدمت منذ أمدٍ بعيد وفي الأيام الحالية تتوفر بأشكال مُختلفة وأكثر نحافةً وغالباً ما تُصنع من الفولاذ عالي المقاومة ، و من جهة أخرى الألياف الصناعية أصبحت ذات أهمية واسعة نظراً لفعاليتها المعتدلة في التسليح مقارنةً بالألياف الفولاذية <sup>(٥)</sup>.



شكل (٢-١): أمثلة عن الأشكال المختلفة للألياف المتوفرة تجارياً <sup>(٥)</sup>

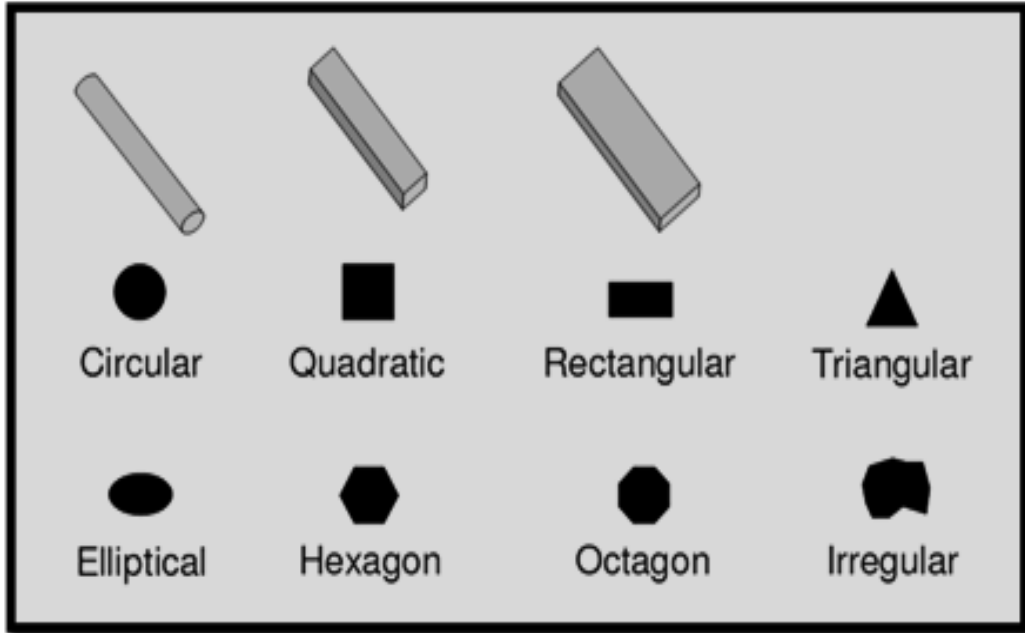
الألياف المستخدمة في الخرسانة يمكن أن تُصنف بطرق مختلفة <sup>(٥)</sup>:-

أولاً:- حسب نوع مادة الألياف إلى :-

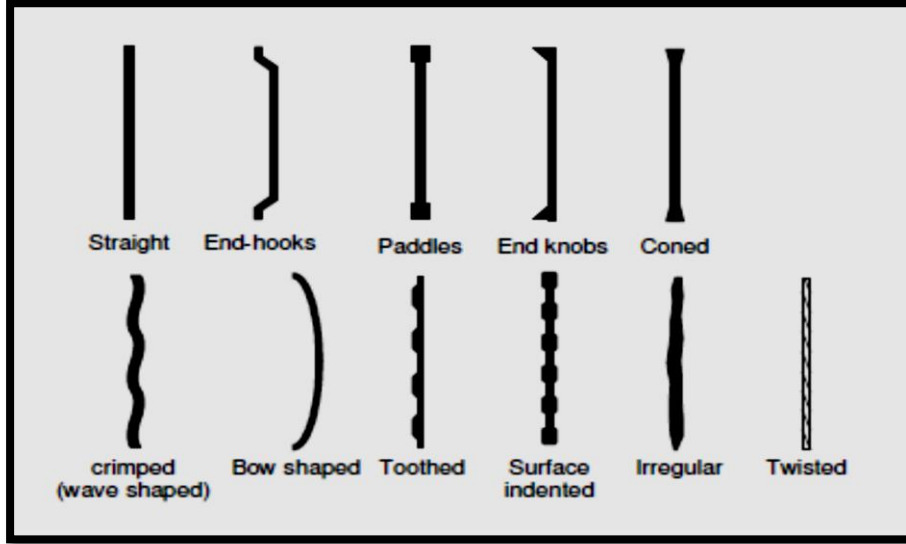
- طبيعية عضوية مثل ( السليلوز ،القنب ،الخيزران ) .
  - طبيعية معدنية ( الأسبستوس ) .
  - صناعية (ألياف الفولاذ ،التيتانيوم ،الزجاج ،الكربون ،البوليمرية ) .
- ثانياً:- حسب خصائصها الفيزيائية/الكيميائية مثل (الكثافة ، الخشونة السطحية ،الفعالية الكيميائية ، مقاومة الحريق والقابلية على الاشتعال) .

ثالثاً:-حسب الخصائص الميكانيكية مثل (مقاومة الشد ،معامل المرونة ، المطيلية (Ductility) ،الإستطالة (Elongation) لحد الفشل ،وخصائص التلاصق للسطح .

هناك العديد من الخصائص الهندسية المتعلقة بشكل المقطع ، الطول ،القطر .حيث أن مقطع الألياف ممكن ان يكون دائري ،مستطيل ،مربع ،مثلث ،مسطح ،غير منتظم أو متعدد الأضلاع .

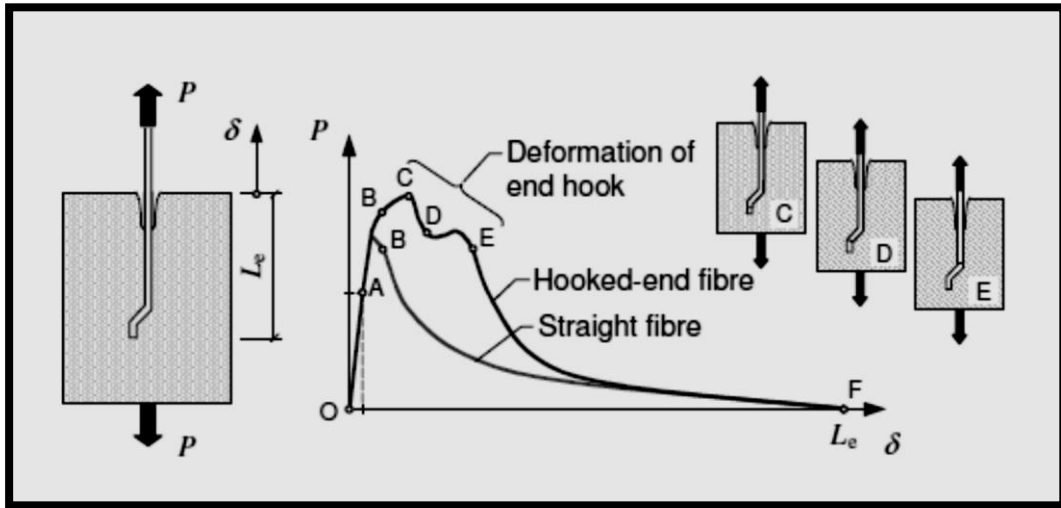


شكل (٢-٢): أمثلة عن أشكال المقطع العرضي للألياف (٥)



شكل (٢-٣): أمثلة متنوعة عن أشكال الألياف (٥)

في بعض أنواع الألياف تُضاف إلى السطح بعض الخدوش أو يُعامل السطح بمواد لتحسين ترابطه مع الخرسانة ، الشكل (٢-٤) أدناه يوضح الفرق بين ألياف الفولاذ المستقيمة والمعقوفة النهايات من حيث تحسين مقاومة السحب التي يمكن الحصول عليها من خلال معاملة الألياف .



شكل (٢-٤): مثال عن تأثير تعديل شكل الألياف (٥)

لغرض التحسين من خصائص المقاومة للخرسانة يجب أن يكون للألياف معامل مرونة أعلى من الخرسانة التي تُضاف لها الألياف ، وهذا صعب التحقيق بالنسبة للألياف الصناعية (Synthetic) . وعلى العموم فإنّ البحوث النظرية والعملية بيّنت أنّه حتى وإن كانت الألياف بمعامل مرونة قليل ، فإنّ

هناك تحسينات في المتانة (*Toughness*) ،مقاومة الصدم ،إستيعابية الإنفعال (*Strain capacity*) والسيطرة على التشققات في الخرسانة الليفية.

الأصناف الرئيسة للألياف هي ؛ الفولاذية ، الزجاجية ، الصناعية والطبيعية والجدول ادناه يوضح خصائص بعض أنواع الألياف .

جدول رقم (٢-١) الخصائص الفيزيائية لبعض أنواع الألياف (٥)

Type of Fibre	Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Specific gravity [ $\text{g/cm}^3$ ]	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Ultimate elongation [%]
<b>Metallic</b>					
Steel	5-1 000	7.85	200-2 600	195-210	0.5-5
<b>Glass</b>					
E glass	8-15	2.54	2 000-4 000	72	3.0-4.8
AR glass	8-20	2.70	1 500-3 700	80	2.5-3.6
<b>Synthetic</b>					
Acrylic (PAN)	5-17	1.18	200-1 000	14.6-19.6	7.5-50.0
Aramid (e.g. Kevlar)	10-12	1.4-1.5	2 000-3 500	62-130	2.0-4.6
Carbon (low modulus)	7-18	1.6-1.7	800-1 100	38-43	2.1-2.5
Carbon (high modulus)	7-18	1.7-1.9	1 500-4 000	200-800	1.3-1.8
Nylon (polyamide)	20-25	1.16	965	5.17	20.0
Polyester (e.g. PET)	10-8	1.34-1.39	280-1 200	10-18	10-50
Polyethylene (PE)	25-1 000	0.96	80-600	5.0	12-100
Polyethylene (HPPE)	-	0.97	1000-4 000	80-150	2.9-4.1
Polypropylene (PP)	10-200	0.90-0.91	310-760	3.5-4.9	6-15.0
Polyvinyl acetate (PVA)	3-8	1.2-2.5	800-3 600	20-80	4-12
<b>Natural - organic</b>					
Cellulose (wood)	15-125	1.50	300-2 000	10-50	20
Coconut	100-400	1.12-1.15	120-200	19-25	10-25
Bamboo	50-400	1.50	200-440	33-40	-
Jute	100-200	1.02-1.04	250-350	25-32	1.5-1.9
<b>Natural - inorganic</b>					
Asbestos	0.02-25	2.55	200-1 800	164	2-3
Wollastonite	25-40	2.87-3.09	2 700-4 100	303-530	-

## Polypropylene

## ١.٢.٢ ألياف البولي بروبيلين

### Fibers

وهذه أحد أنواع الألياف الصناعية التي يتدخل الإنسان في تركيبها وهي ناتج للصناعات البتروكيميائية والصناعات النسيجية وهو من أكثر انواع الألياف الصناعية إستخداماً . إن الإختلافات بين أنواع الألياف الصناعية هي مقاومة الشد (*Tensile Strength*) ومعامل المرونة (*Elastic Modulus*) والأخير غالباً ما يكون أقل من ذلك الخاص بالمادة الرابطة.

ألياف البولي بروبيلين يمكن أن تنتج على شكل حزمة من الألياف الشعرية (*Monofilaments*) أو بأقطار أكبر (*Fibrillated*) كما ويمكن وضعها بشكل منتشر (*Dispersed*) أو على شكل حصيرة (*Mat*). فائدة ألياف البولي بروبيلين هي مقاومة القلويات (*Alkali Resistance*) ومن مساوئها هي الترابط الضعيف مع المادة الرابطة (*Matrix*) وحساسيتها لضوء الشمس والأكسجين وهذا يتطلب معاملة خاصة وحفظها في أكياس خاصة .

وحسب الباحثان *Bentur* و *Mindess* (٢٠٠٦) <sup>(٦)</sup> ، من الممكن أن تُستخدم ألياف البولي بروبيلين بعدة طرق لتسليح الخرسانة ، إذ بالإمكان أن تُستخدم لتسليح الخرسانة حيث تكون هذه الألياف كألواح رقيقة (*Thin Sheet*) و تُعتمد كتسليح أساسي وفيه يكون محتوى الألياف عالياً يتجاوز (٥%) وبما إنها تتجاوز المرحلة الحرجة المحددة حسب النسبة الحرجة للألياف فإن المادة يُشار إليها كخرسانة ليفية عالية الأداء (*High Performance FRC*) ، وفي هذا النوع من التسليح لا يُعتمد على طرق الخلط البسيطة لتحضير و خلط الألياف والمادة الرابطة وبدلاً من وضع تلك الطبقات بواسطة اليد تُستخدم تقنيات خاصة لإتمام تلك العملية .

النوع الثاني من التسليح هو التسليح الثانوي وفيه ألياف البولي بروبيلين بمعامل مرونة مُنخفض وبنسب إحتواء بحدود (١%) من الحجم ، وتُضاف لتقليل تشققات الإنكماش اللدن (*Plastic Shrinkage*) وليس لها تأثير على تشققات الخرسانة المتصلبة وتستخدم أيضاً للحماية في حالة حدوث الحرائق . فعند حدوث الحريق تذوب الألياف وتكون قنوات دقيقة تسمح بخروج الدخان المتكون خلال الحريق وهذا أيضا يحمي غطاء التسليح من التلف .

## Steel

## ٢.٢.٢ ألياف الحديد

### Fibers

ألياف الحديد تُصنع بصورة عامة من حديد الكاربون (*Carbon Steel*) أو الحديد المُقاوم للصدأ (*Stainless Steel*) حيث يُستعمل الأخير في المنشآت التي تتطلب استخدام الياف حديد مقاومة للتآكل (*Corrosion Resistance*). مقاومة الشد لهذه الألياف في مدى يتراوح بين (٢٠٠-٢٦٠٠ MPa) الإستطالة القصوى تتراوح بين (٠,٥-٥%) .على الرغم من تفضيل كون مقاومة الشد للألياف أعلى من المادة الرابطة إلا أن الألياف القوية جداً يكون لها تأثير عكسي على كفاءة التسليح ؛ تجارب السحب (*Pull-out*) أظهرت أن المقاومة المنخفضة للمادة تقابلها المقاومة العالية لألياف الحديد تُسبب تشطّي (*Spalling*) حاد في الخرسانة حول فتحة خروج الليف . ولتحديد الإستفادة من الألياف ، فإن الأهمية

الأساسية هي سعة الخضوع (*Yield Capacity*) للألياف لتجنب كسرها ، حيث أن معامل المرونة يكون بحوالي ( $200\text{ GPa}$ ) وهذا يتجاوز بكثير معامل مرونة المادة الرابطة .

الألياف المستقيمة والملساء المستخدمة أولاً أصبحت نادرة الاستخدام في الوقت الحاضر في الخرسانة معتدلة المقاومة (*Normal Strength*) بسبب عدم الكفاءة في الترابط مع المادة ، ومن ناحية ثانية في الخرسانة عالية المقاومة (*High Strength*) أصبح استخدام الألياف المستقيمة المطلوبة بالنحاس (*Brass*) شائعاً جداً، ولتحسين الترابط من المفضل ان تكون الألياف ذات نسبة باعية (*Aspect Ratio*) عالية ؛ وحتى الأخيرة يجب أن يكون لها حدود حيث أن الألياف النحيفة جداً وبنسبة باعية ( $l_f/d_f$ ) أكبر من (١٠٠) تميل إلى التشبث مع بعضها وهذا يقلل من التشغيلية ومن المحتمل أن تؤثر سلباً على الخصائص الميكانيكية للخرسانة الليفية المتصلبة وهذا الأخير بسبب عدم إنتظام توزيع الألياف في الخرسانة.

### ٣,٢ الخرسانة الليفية الهجينة (*Hybrid Fiber Reinforced Concrete*)

أي مزيج يُسمى بالـ (هجين) ، إذا تم خلط نوعين أو أكثر من الألياف لتوضع في الخرسانة لإنتاج خليط يأخذ منافع كل نوع منفصل من الألياف ويكتسب إستجابة تآزرية للأحمال ، فمثلاً الألياف الصناعية (*Synthetic*) بمعامل مرونة عالي تُخلط مع الألياف الفولاذية عالية المقاومة لإنتاج خرسانة ليفية متطورة .

إن فوائد نظام الخرسانة الليفية الهجينة يُمكن أن تُدرج كالاتي <sup>(٧)</sup> :-

١. لتوفير نظام يكون فيه أحد أنواع الألياف المستخدمة أقوى وأكثر صلادة (*Stiff*) يُحسن إجهاد الشق الأول (*First crack stress*) والمقاومة القصوى (*Ultimate strength*) ، والنوع الآخر الذي يكون أكثر مرونة (*Flexible*) و مطيلية (*Ductility*) ويُحسن من المتانة (*Toughness*) و الإنفعال في منطقة الشق اللاحق (*Post-crack zone*) .
٢. يكون التسليح في الخرسانة بنوعين ، النوع الأول الذي تكون فيه الألياف أصغر تقوم بربط التشققات الدقيقة (*Micro-crack*) (الشعرية) والسيطرة على نموها وهذا يُزيد من مقاومة الشد للخرسانة الحاوية على هذه الألياف ، أما النوع الثاني الذي تكون فيه الألياف أطول وأكبر ويمنع إنتشار الشقوق الكبيرة (*Macro-crack*) .



٣. لتوفير مزيج من التسليح بالألياف ذات ديمومة (*Durability*) مختلفة ، إذ إن وجود النوع ذي الديمومة (*Durable*) يُزيد المقاومة و/أو المتانة للخرسانة بعد مدة طويلة ، بينما النوع الثاني يضمن الأداء قصير الأمد (*Short-term*) خلال عمليات النقل والصب .

آلية تقوية (*Strengthening*) وزيادة متانة (*Toughening*) الخرسانة يُمكن تحقيقها بطريقتين؛ لتقوية المادة ، فإن المسافة بين الألياف المُراد إستخدامها يَجِب أن تكون قليلة لِتجنب أي خلل (*Flaw*) في الخرسانة ، وهذا يُحقق من خلال إستخدام ألياف قصيرة منفصلة ، هذه الألياف تقوم بربط التشققات الدقيقة (*Micro-crack*) قبل أن تُسبب أي خلل في الخرسانة. بينما لزيادة متانة (*Toughening*) المادة تُستخدم ألياف ذات سعة إنفعال قصوى عالية (*Ultimate Strain Capacity*) لِتتمكن من ربط التشققات الكبيرة (*Macro-crack*) في الخرسانة .

## Literature Review

## ٤, ٢ الدراسات السابقة

تمتاز الخرسانة الاعتيادية بطبيعتها القصفة (*Brittle*) التي تؤدي الى حصول فشل القص الذي يحاول المصممون تجنبه باختيار الحلول المناسبة التي تغير صفة الخرسانة هذه الى مادة مطيلية (*Ductile*) . ومن اهم الحلول التي تناولها العديد من الباحثين هي إضافة الألياف الى الخرسانة الاعتيادية لتحسين صفاتها التي تعد ذات تأثير كبير في سلوك الخرسانة حيث يصبح للخرسانة الليفية مقاومة الانضغاط العالية مقارنةً بالخرسانة الأصلية ومقاومة شد عالية يُكسبها إياها وجود الاليف وخاصة في حالة الشد لمرحلة ما بعد التشقق وبالإضافة الى زيادة مقاومة الخرسانة للشد فإنها تزيد من مقاومة الخرسانة للقص، اللي والانشاء والتقليل من عرض الشقوق والحد من انتشارها (*Crack-Arrest Theory*).

يتضمن هذا الفصل عرضاً موجزاً لبعض الدراسات السابقة التي تناولت موضوع اضافة الاليف (الحديدية والبولي بروبيلين) الى الخرسانة وما ينتج عن هذه الاضافة من تحسين للخواص الميكانيكية لتلك الخرسانة .

### (Polypropylene Fiber)

### ٤, ٢, ١ اليف البولي بروبيلين

العديد من الأبحاث أجريت لدراسة تأثير إضافة هذه الألياف على الخصائص الهندسية لمونة السمنت وكذلك الخرسانة .

*Ramakrishnan* و *Hosali* (١٩٨٩)<sup>(٨)</sup> ، قاما بإجراء دراسة عملية بينت ان إضافة ألياف البولي بروبيلين إلى الخرسانة بكميات تتراوح ما بين (٠,١ الى ٢,٠)% من الحجم ليس لها تأثير على

معامل المرونة بعمر (٧ و ٢٨) يوم . كذلك بينت النتائج أن إضافة الياف البولي بروبيلين لا تؤثر على الفحوصات التي تُجرى باستخدام فحص سرعة النبضة (*Pulse velocity test*) إذا ما تم إضافة تلك الألياف إلى الخرسانة المفحوصة .

وكما هو الحال بالنسبة لنتائج مقاومة الانضغاط فإن إضافة الياف البولي بروبيلين ليس لها تأثير على خاصية مقاومة الانثناء وهذه النتائج هي ما تم عرضه من قبل العالم ، **Zollo** (١٩٨٤)<sup>(٩)</sup> ، التي بينت تأثير الياف البولي بروبيلين عند إضافتها بنسبة حجمية مقدارها (٠,١%) ، حيث تكون هناك زيادة طفيفة في مقاومة الانثناء عند استخدام الالياف بنسب حجمية (٠,٧ الى ٢,٦)% ، وعند النسب الحجمية (٠,٢ الى ٠,٣)% هناك نقصان طفيف في مقاومة الانثناء.

بين الباحث **Ramakrishnan وآخرون** (١٩٨٩)<sup>(١٠)</sup> ، تأثير إضافة الياف البولي بروبيلين بنسب حجمية تتراوح بين (٠,١ الى ٢,٠)% على مقاومة انضغاط الخرسانة ، وقد بينت النتائج بأن إضافة هذه الألياف على الخرسانة وبنسب حجمية مختلفة ليس لها تأثير على مقاومة الانضغاط . وبواسطة الباحث نفسه **Ramakrishnan** (١٩٨٩) تم إستنتاج أن استخدام كميات عالية من هذه الألياف (٢,٠)% من الحجم تنتج خرسانة ذات قابلية تشغيل واطئة ، قابلية نضح (*Bleeding*) وانعزال (*Segregation*) اكبر ، هواء محصور (*Entrapped air*) اعلى نسبياً بمقدار ١٣,٩% و كثافة وزنية (*Unit weight*) أقل وهذا يسبب تقليل مقاومة الانضغاط .

إنّ الملاحظة الأخيرة تبين مدى أهمية تصحيح نسبة الركام عند استخدام كميات عالية من الألياف ، إذ عند استخدام نسب عالية يجب اعتماد خلطات تجريبية (*Trail mix*) لمعرفة نسب الخلط المثلى . وقد تجلّى من خلال بحث آخر للباحث نفسه **Ramakrishnan** (١٩٨٧)<sup>(١١)</sup> يبين أن إضافة (٠,١ الى ١,٠)% كنسبة حجمية لا يقلل من مقاومة انضغاط الخرسانة .

أُجريت دراسة من قبل الباحثين **Hosalli و Ramakrishnan** (١٩٨٩)<sup>(١٢)</sup> ، على مميزات الأداء للخرسانة المسلحة بالألياف بنسب احتواء قليلة (الياف معقوفة مع الياف محززة النهايات وتم استخدام الياف البولي بروبيلين ) ، وقد اظهرت النتائج أنّ النسب المستخدمة من الالياف في الخرسانة لم تسجل فرقاً ظاهر على مقاومة الانثناء القصوى ، التشقق اللاحق (*Post-cracking*) وسعة تحمل الأحمال (*Load carrying-capacity*) . بصورة عامة فإن زيادة محتوى الألياف يزيد من مقاومة الصدم و متانة الانثناء (*Flexural toughness*) .

قام الباحث **Toutanji و آخرون (١٩٩٨)** <sup>(١٣)</sup> ، بدراسة تأثير الياف البولي بروبيلين على النفاذية (*Permeability*) ومقاومة الصدم للخرسانة المسلحة بالألياف . الاطوال المستخدمة هي (١٩ ملم و ١٢,٥ ملم) وبنسب حجمية (٠,١ ، ٠,٣ ، ٠,٥ و ١,٠) % كذلك تم اضافة غبار السيليكا (*Silica fume*) كإستعاضة عن جزء من الإسمنت وبنسب (٥ الى ١٠) % من وزن الإسمنت . النتائج بينت أن إضافة غبار السيليكا الى الخرسانة الحاوية على الألياف يُحسن من توزيع الألياف في الخلطة بالإضافة إلى تقليل نفاذية الخرسانة المسلحة بالألياف .

استخدم كل من **Dubey و Banthia (٢٠٠٠)** <sup>(١٤)</sup> ، طريقة فحص المقاومة المتبقية (*Residual strength test method*) لقياس متانة الإنثناء (*Flexural Toughness*) للخرسانة المسلحة بألياف البولي بروبيلين في صيغة المقاومة القصوى المتبقية اللاحقة (*Post peak residual strength*) . هذه الطريقة لها القدرة على تبيان تأثير خصائص مختلفة للألياف مثل ( النوع ، الطول ، التكوين *Configuration* ، النسبة الحجمية للألياف ، الشكل الهندسي *Geometry* و معامل المرونة ) . النتائج استندت على مجموعتين من الفحوصات ، فحوصات المجموعة الأولى بينت أن الياف البولي بروبيلين تحسن المتانة (*Toughness*) مقارنة ببقية الألياف ، فحوصات المجموعة الثانية بينت أن الياف الحديد المعقوفة النهايات (*Hooked-end*) تعطي مقاومة إنثناء أكثر من تلك التي باستخدام الياف الحديد المموجة (*Crimped*) في الخرسانة .

أما الباحث **Al-Rubiy (٢٠٠٢)** <sup>(١٥)</sup> ، فقد درس تأثير التسليح بألياف البولي بروبيلين على الخصائص الهندسية عند إضافة نسبة حجمية من هذه الألياف تتراوح بين ( ٠ إلى ٦,٠) % . و قد تمت دراسة تأثير محتوى الألياف على قابلية التشغيل ، مقاومة الانضغاط ، معايير الكسر ، متانة الإنثناء (*Flexural toughness*) ، سرعة النبضة فوق الصوتية (*Ultrasonic pulse velocity*) ، معامل المرونة الديناميكي و مقاومة الصدم . النتائج أظهرت أن إضافة الياف البولي بروبيلين تقلل من قابلية التشغيل مع زيادة نسبتها الحجمية في الخرسانة ، وقابلية التشغيل الواطئة تجعل من الخرسانة عرضة للنضح (*Bleeding*) ، غير متجانسة و تزيد من مساميتها (*Porosity*) .

درس الباحثان **Mark و Ziyad (٢٠٠٢)** <sup>(١٦)</sup> ، ميكانيكية تشققات الانكماش اللدن (*Plastic shrinkage*) وكذلك تأثيرات الياف البولي بروبيلين وغبار السيليكا على سلوك الخرسانة . ففي الخرسانة الحاوية على الألياف يقوم الليف بتقييد التشققات حيث يعمل على منع تبخر الماء (*Prompting water retention*) ، تعجيل التجمد ، والسيطرة على نمو التشققات للخرسانة الطرية . وقد وجد الباحثان أن استخدام نسبة حجمية (٠,١ %) من الياف البولي بروبيلين يكون فعالاً في تقليل

تشققات الانكماش مع وجود غبار السيليكا بنسبة وزنية من الإسمنت مقدارها (٥%) ، بينما استخدام النسبة (٣%) لألياف البولي بروبيلين يكون ناجحاً في السيطرة على تشققات الانكماش اللدن بوجود غبار السيليكا بنسبة (١٠%) .

**Yao Wu (٢٠٠٢) <sup>(١٧)</sup>** ، أجرى دراسة عملية حول سلوك مقاومة الإنثناء (*Flexural Strength*) للعتبات الخرسانية المعززة بألياف البولي بروبيلين . إذ تمت دراسة خصائص المقاومة والتشوهات لهذه العتبات ذات الأبعاد (mm ٥٠٠×١٠٠×١٠٠) وقد تم استخدام نوعين من الياف البولي بروبيلين ونسب حجمية مختلفة (٢،٠ ، ٥،٠ ، ١،٠ ، ٥،٠%) وتم فحص العتبات بثلاث نقاط تحميل . وجد من خلال النتائج أن مقاومة الخرسانة اللينة للشد ولانضغاط تقل بصورة ملحوظة ، بينما متانة الإنثناء (*Flexural Toughness*) تتحسن مقارنة بالخرسانة الخالية من الألياف ، وتم تحديد الخصائص والشكل والنسب الحجمية للألياف كعوامل مؤثرة على تحسين خصائص الخرسانة .

أما الباحث **Piti Sukontasukku (٢٠٠٧) <sup>(١٨)</sup>** ، فقد درس طريقتين مختلفتين وهما (*ASTM C-1018*) <sup>(١٩)</sup> و (*JSCE SF-٤*) <sup>(٢٠)</sup> لقياس المتانة (*Toughness*) للخرسانة المسلحة بألياف الحديد والياف البولي بروبيلين المعرضة إلى حمل انحناء (*Bending*) . ٢٥ نموذج عتبة (*Beam*) بأبعاد (٣٥٠ x ١٠٠ x ١٠٠) ملم تم فحصها ، ونسب الخلط كانت (١:٠,٤٥:٠,٧:٢,٧) (سمنت: ماء: ركام ناعم: ركام خشن) ، تم استخدام نوعين من الألياف : الياف الحديد والياف البولي بروبيلين و بنسب حجمية مختلفة : ١% و ٢% ، وعند المقارنة بين هاتين الطريقتين فإن استخدام طريقة (*JSCE*) لقياس المتانة (*Flexural*) لا يوجد فيه اي صعوبة ليعكس خصائص المتانة لخرسانة الياف الحديد ، بينما بالنسبة لخصائص خرسانة الياف البولي بروبيلين فإن طريقة (*JSCE*) لا تبدو كفوءة لعكس خصائص المتانة.

من جانب آخر قيم المتانة المستخرجة بواسطة (*ASTM*) وقيم مختلفة للأود تبدو جيدة لعكس الصورة الصحيحة لخصائص المتانة لكلا نوعي الخرسانة بألياف الحديد والياف البولي بروبيلين . وبالاعتماد على مؤشر المتانة لوحده بغض النظر عن منحنى الحمل-الأود يكون الوصف تقريبي لسلوك كلا نوعي الخرسانة.

**Suji و آخرون (٢٠٠٧) <sup>(٢١)</sup>** ، أجروا دراسة عملية حول خصائص الأداء للعتبات الخرسانية الحاوية على الياف البولي بروبيلين . طول الألياف المستخدمة هي (٢٤ mm) وبكميات هي (٠,٩ ، ١,٨ ، ٢,٧ kg/m<sup>٣</sup>) وقد تم فحص الخرسانة الطرية للمقارنة بين قابلية التشغيل للخرسانة الخالية

والحماية على الألياف ، و تضمن البرنامج العملي للدراسة إجراء فحوصات الخصائص الميكانيكية للخرسانة المتصلبة مثل مقاومة الإنضغاط (*Compressive Strength*) ، شد الإنشطار (*Split Tensile*)، معاير الكسر (*Modulus of Rupture*) ومقاومة الإنثناء (*Flexural Strength*) . وقد بينت النتائج أنّ الزيادة في مقاومة الإنضغاط كانت (٣٦,٢٥% ، ٢٦,٢٠% و ٢٣,٧٥%) والزيادة في مقاومة الإنثناء هي (٢١% ، ١٦,٦% و ٢٣%) للخلطات (١ ، ٢ ، ٣) على التوالي مقارنة بالخلطة المرجعية . وتمت ملاحظة التحسينات في المقاومة و المطيلية من خلال الدراسة العملية للعتبات الليفية المعززة بحديد تسليح طولي ومفحوصة تحت نقطتي تحميل .

وقد قام الباحث **Hamed Layssi وآخرون (٢٠٠٨)** <sup>(٢٢)</sup> بدراسة الديمومة (*Durability*) والانكماش (*Shrinkage*) في الخرسانة المسلحة بألياف البولي بروبيلين . ولمعرفة خصائص هذه الخرسانة تم اعتماد عدة خلطات وبنسب احتواء مختلفة للألياف (٠,١ و ٠,٤%) وبأطوال مختلفة (١٢ و ١٩) ملم ، نسبة الماء/السمنت ثابتة لجميع الخلطات ، وتم استخدام مواد ملدنة فائقة (*Super plasticizer*) لزيادة قابلية التشغيل. النتائج المستخلصة من هذا البحث بينت أن لإضافة الياف البولي بروبيلين الى الخرسانة يحسن من متانة الانثناء (*Flexural toughness*) بصورة ملحوظة ، بينما إضافته للخرسانة لا تحسن من الخصائص الميكانيكية الأخرى كمقاومة الانضغاط .

إضافة الياف البولي بروبيلين يقلل بصورة ملحوظة من إنكماش الجفاف (*Drying Shrinkage*) للخرسانة على الرغم من كونه لا يحسن من ديمومة الخرسانة مثل النفاذية للماء.

## ٢,٤,٢ الألياف الحديدية (*Steel Fiber*)

الخرسانة المسلحة بالألياف الحديدية *SFRC* كثيرة الاستخدام في التبليط والرصف وهذا في سبيل تقليل التشقق و زيادة مقاومة الصدم وتقليل سمك التبليط . ونتيجة للتحسينات الناتجة عن إضافة هذه الألياف في خصائص الخرسانة أدى ذلك الى استخدامها في أوعية الضغط في المفاعلات النووية و تبطين الأنفاق و السدود و العتبات مسبقة الإجهاد و المنشآت البحرية و البلاطات الأرضية و تثبيت المنحدرات و الطرق و عمليات التبليط والرصف.

النسب الحجمية لألياف الحديد المضافة الى الخرسانة تتراوح بين (٠,٢٥ الى ٢%) ، النسبة التي تزيد عن ٢% تقلل تشغيلية الخلطة بصورة كبيرة وتؤثر سلبياً على توزيع الالياف في الخلطة وتتطلب الخلطة تصميمًا خاصاً او وجود تقنيات تساعد على وضع الخرسانة الطرية (*Fresh concrete*) في المكان المطلوب بصورة صحيحة.

تعد الياف الحديد من اكثر انواع الالياف استخداماً ، وقد شهد استخدامها نمواً كبيراً خلال العقود الثلاثة الماضية وفيما يأتي عرض لبعض الدراسات التي تناولت استخدام الياف الحديد.

**Alezika و Beaumont (١٩٧٣)** <sup>(٢٣)</sup> ، أجريا دراسة عن ميكانيكية الكسر (*Fracture Mechanism*) للخرسانة المسلحة بأطوال واقطار مختلفة من الياف الحديد واستنتجا بأن الكسر (*Fracture*) له علاقة مباشرة بأطوال ونسبة حجم الاليف بينما ليس له علاقة بأقطار الاليف.

**Batson و آخرون (١٩٧٢)** <sup>(٢٤)</sup> ، و **Williamson و Knab (١٩٧٥)** <sup>(٢٥)</sup> بينوا بأن الياف الحديد بإمكانها التعويض عن أطواق التسليح (*Stirrups*) لمقاومة القص في العتبات الخرسانية المسلحة اعتياديا تحت احمال الانثناء (*Flexural loading*) .

**Shah و Naaman (١٩٧٦)** <sup>(٢٦)</sup> أجريا فحوصات على المونة المسلحة بالاليف بأطوال ونسب حجمية مختلفة لكلا نوعي الاليف الحديدية والزجاجية ووجدا بأن الشد (*Tensile*) ومثانة الانثناء (*Flexural toughness*) بوجود الاليف تعادل مرتين الى ثلاثة مرات من مقاومة الانثناء بدون وجود الاليف بينما الانفعالات أو قيم الأود كبيرة بقدر عشر مرات من تلك الخالية من الاليف.

أنجزت العديد من الدراسات على نماذج الخرسانة المسلحة بالاليف تحت تأثير حمل الانحناء (*Bending*) و بوجود القص، من قبل **Niyogi (١٩٨١)** و **(١٩٨٢)** <sup>(٢٨،٢٧)</sup> و **Narayan (١٩٧٩)** و **(١٩٨١)** <sup>(٣٠،٢٩)</sup> .

**Fanella و Naaman (١٩٨٥)** <sup>(٣١)</sup> اقترحا نموذجاً تحليلياً للتنبؤ بمنحني الإجهاد-الانفعال لمونة الخرسانة المسلحة بالاليف مع الاخذ بالحسبان شكل الليف، حجم العينة والخصائص الهندسية ، وقد استخدمتا ثوابت مختلفة لتعريف الجزء الصاعد والجزء النازل من منحني الإجهاد-الانفعال . أربع ثوابت استخدمت لتمثيل الجزء الصاعد ، أربع ثوابت اخرى بالنسبة للجزء النازل . الثوابت يتم ايجادها باستخدام خصائص المنحني مثل معامل المرونة وايضا من خلال معادلات وضعية وجدت باستخدام منحنيات النتائج العملية.

وفي بحوث سابقة ايضا قام **Ghosh و آخرون (١٩٨٩)** <sup>(٣٢)</sup> ؛ **Agrawal و آخرون (١٩٩٦)** <sup>(٣٣)</sup> ؛ **Gao و آخرون (١٩٩٧)** <sup>(٣٤)</sup> ؛ **Padmarajaiah (١٩٩٩)** <sup>(٣٥)</sup> ؛ **Song و Hwang (٢٠٠٤)** <sup>(٣٦)</sup> ؛ بدراسة تحسين الخصائص الميكانيكية في الخرسانة نتيجة إضافة الياف الحديد والتي تم التعبير عنها كدالة لمؤشر التسليح بالاليف ( $RI = V_f l_f / d_f$ ) ومقاومة الخرسانة.

**Banthia و Francois (١٩٩٤) <sup>(٣٧)</sup>** في دراستهم عن خصائص المتانة للخرسانة الحاوية على الياق الحديد إستخدما أربعة انواع مختلفة من الياق الحديد المحرّفة ، ثلاث قيم لمقاومة الانضغاط . التسليح بألياف الحديد هو بمقدار (٤٠ كغم/م<sup>٣</sup> ) . في هذه الدراسة تم فحص مقاومة الانضغاط ومقاومة الانثناء ، وبالاكتفاء على البرنامج العملي للدراسة بينت النتائج بأن هذا المقدار من التسليح بالألياف ليس له تأثير على مقاومة الانضغاط ، معامل المرونة ومعابر الكسر .

الالياق المحرّفة بصورة عامة تحسن قيم المتانة واستيعابية امتصاص الطاقة للخرسانة (*Energy-absorption Capabilities*) وبالاكتفاء على الانواع الأربعة المستخدمة فإن الياق الحديد المعقوفة عند النهايات فقط تكون فعالة أكثر من تلك المحرّفة على طول الليف . وكذلك فإن مقاومة المادة تتأثر بصورة ملحوظة بخصائص المتانة وعند المقاومة العالية هناك إنخفاض مفاجئ في استيعابية تحمل الأحمال (*Load-carrying capacity*) بعد الشق الأول .

إستنتج الباحث **Banthia (١٩٩٧) <sup>(٣٨)</sup>** من خلال الدراسة العملية التي قام بها بأن الفائدة العملية من الالياق هي في الحد من نمو الشق (*Crack Growth*) وكذلك عند تعاقب الزيادة في عرض الشق في حالة تعرض الخرسانة للإجهادات .

**Eren و Celik (١٩٩٧) <sup>(٣٩)</sup>** بحثا في تأثير غبار السيليكا (*Silica fume*) والياق الحديد على بعض خصائص الخرسان عالية المقاومة (*High-strength concrete*) . النتائج أظهرت أنّ الزيادة في كمية غبار السيليكا والألياف يقلل من قابلية التشغيل . وقد بينا من خلال النتائج أنّ غبار السيليكا له تأثير إيجابي على مقاومة الانضغاط ، أما بالنسبة لألياف الحديد فإنّ تأثيرها يكون قليلاً إلى حدٍ ما .

**Samuel Knight و Elavenil (٢٠٠٧) <sup>(٤٠)</sup>** ، قاما بإجراء دراسة عملية حول سلوك العتبات الخرسانية المزودة بالألياف الفولاذية . تم فحص ٣٠ نموذج عتبة بأبعاد (١٠٠×١٠٠×٥٠٠ mm) ، أما متغيرات البحث فهي النسبة الباعية (*Aspect Ratio*) للألياف وكانت (٥٠ ، ٧٥ ، ١٠٠) والنسبة الحجمية المأخوذة للألياف في الخرسانة وهي (٠,٥ ، ٠,٧٥ ، ١%) . نتائج فحص هذه النماذج أظهرت زيادة في المطيلية (*Ductility*) للعتبات بنسبة (٦٥-٨٠%) العائدة للنسب الحجمية (٠,٥ و ٠,٧٥%) على التوالي وعند النسبة الحجمية (١%) تزداد المطيلية إلى مرتين ونصف مقارنة بالعتبات الخالية من الألياف .

**Juarez و آخرون (٢٠٠٧)**<sup>(٤١)</sup> ، درسوا سلوك الشد القطري (*Diagonal Tension*) من خلال فحص ١٦ نموذج من العتبات بأبعاد (mm ٢٠٠×٢٥٠×١٥٠) والمسلحة بحديد التسليح طولي وألياف الحديد وأطواق (*Stirrups*) لمقاومة القص ثبتت عليها مقاييس لقياس الإنفعال ومدى تأثيره بوجود الألياف . متغيرات البحث المدروسة هي مقاومة إنضغاط الخرسانة والنسب الحجمية للألياف وهذه النسب هي (٠، ٠،٥، ١، ١،٥، %) وتم فحص العتبات بنقطتي تحميل و تحت حمل ساكن يُنتج إجهادات قطرية عالية . نتائج البحث بينت ان زيادة النسب الحجمية للألياف تزيد من مقاومة القص (*Shear Strength*) والمطيلية (*Ductility*) للعتبات .

**Mangiavillano و Campione (٢٠٠٨)**<sup>(٤٢)</sup> ، درسوا سلوك الإنثناء للعتبات الخرسانية المسلحة الخالية والحاوية على الألياف تحت أحمال (*Monotonic*) و (*Cyclic*) . تم فحص ١٢ عتبة بأبعاد (mm ٦٠٠×١٥٠×١٥٠) ومسلحة بحديد تسليح طولي أعلى وأسفل المقطع بقضبان محرّفة (*Deformed*) ومسلحة بأطواق الحديد لمقاومة القص وتم فحصها بتسليط الحمل بثلاث نقاط تحميل . صُممت الخرسانة على أساس مقاومة الإنضغاط (٣٠MPa) وأضيف إليها ألياف حديد معقوفة النهايات ونسبة حجمية (١%) وتم إعتداد ثلاث قيم مختلفة لغطاء حديد التسليح وهي (٥، ١٥، ٢٥ mm) . النتائج بينت أن إضافة الألياف تزيد من قابلية تحمل العتبات وتضمن سلوك أكثر مطيلية (*Ductile*) وفي الوقت نفسه تقلل من التآكل بفعل أحمال (*Cyclic*) وإن وجود الألياف يقلل من تشطي غطاء التسليح حتى وإن إستخدم غطاء حديد التسليح بسمك عالي .

**Karahan و Duran (٢٠٠٩)**<sup>(٤٣)</sup> ، في دراستهم عن خصائص الخرسانة المسلحة بألياف الحديد وبوجود الرماد المتطاير (*Fly ash*) درسوا خصائص مثل الكثافة ، قابلية تشغيل الخرسانة الطرية ، مقاومة الانضغاط ، مقاومة شد الانثناء ، مقاومة شد الانشطار ، معامل المرونة ، الانكماش الجاف ، ومقاومة الخرسانة للتجمد والذوبان. نسب إضافة الرماد المتطاير هي (٠، ١٥، ٣٠%) والنسب الحجمية للألياف هي (٠، ٢٥، ٥٠، ١٠٠، ١٥٠%) . النتائج وضحت أن كثافة الخرسانة تزداد مع زيادة محتوى الألياف وتقل بزيادة نسبة الرماد المتطاير ، زيادة محتوى الألياف يقلل من قابلية التشغيل لذا فإن وجود الرماد المتطاير كاستعاضة عن جزء من السمنت يستخدم لتحسين قابلية تشغيل الخلطة .

وحسب نتائج البحث فإن إضافة الياف الحديد تزيد من مقاومة الانضغاط بمقدار قليل، أما مقاومة الانثناء فإنها لا تتأثر ذلك التأثير الواضح بوجود الالياف بنسبة (٢٥، ٥٠، ١٠٠%) ،بينما الزيادة هي (٠- ١٥%) عند النسبة (١%) و (٣٠-٦٦%) عند النسبة (١،٥%) . وان الزيادة في مقاومة الانشطار فهي



(٥-١٠، ٣-٢١، ٣٢-٤٤ و ٧١%) عند النسب (٠,٢٥، ٠,٥، ١، ١,٥%) على التوالي سواء بوجود أو عدم وجود الرماد المتطاير.

إنّ إضافة الياف الحديد لا تُحسن من معامل المرونة وإنما العكس إذ بزيادة الالياف يقل معامل المرونة ، وزيادة الالياف تقلل من الانكماش الجاف. وبعد فحص تعاقب التجمد والذوبان فإن الخسارة في المقاومة بوجود الياف الحديد تقل بمقدار (٥%) إذ تزداد مقاومة الخرسانة للتجمد والذوبان بوجود الالياف مقارنة بالخرسانة الخالية من الالياف.

### ٣,٤,٢ دمج الياف (الحديد-البولي بروبيلين) في الخرسانة المسلحة (SPHFR)

إنّ دمج عدة أنواع من الالياف المنفصلة في الخرسانة المعرضة الى احمال ضروري وفعال وهذا النظام يجمع محاسن ومميزات الألياف المدمجة . فالخرسانة الناتجة من إضافة هذه الألياف تكتسب مقاومة جيدة لتكوين وانتشار التشققات . ونظرا لعدم وجود نوع واحد من الألياف يمكن أن يعزز من مقاومة الخرسانة بصورة شاملة ، فإن نظام الدمج لأنواع الألياف يبرز كمعزز لهذه المقاومة ، ومن بين الكثير من انظمة الدمج بين انواع الألياف فإن دمج الياف الحديد-البولي بروبيلين هو الأكثر شيوعاً.

إنّ دمج ألياف الحديد-البولي بروبيلين له استخدامات في بعض التطبيقات حيث ان النظام المتولد يجمع بين المتانة ومقاومة الصدم مع تقليل الانكماش اللدن لخرسانة الياف البولي بروبيلين.

يُقسم دمج الالياف الى ثلاثة انواع للدمج <sup>(٤٤,٤٥)</sup> ، النوع الاول يعتمد على اساس فعاليتها بسبب تكوينها إذ إنّ احد أنواع الالياف المستخدمة تكون قاسية وقوية تعطي مقاومة شق اول ومقاومة قصوى معتدلتين والالياف الاخرى تكون قابلة للانثناء نسبياً ويؤدي الى تحسين المتانة واستيعاب الانفعال (*Strain Capacity*) في منطقة التشقق اللاحق (*Post-Cracking Zone*). اما النوع الثاني من الدمج فتكون فيه الالياف الممزوجة ذات نسب باعية مختلفة ،الياف القصيرة تربط التشققات الدقيقة (*Micro crack*) وتمنع نمو التشققات والالياف الطويلة تقيد انتشار التشققات الكبيرة وتحسن من متانة الكسر (*Rupture Toughness*) للمزيج الناتج. النوع الاخير يكون على اساس وظيفة الليف ، هذا المزيج مكون من الياف صناعية (*Synthetic*) دقيقة مع الياف الحديد أو الياف صناعية دقيقة مع الياف صناعية كبيرة، وفي هذا المزيج يكون احد النوعين يقوم بتحسين الاداء المبكر للخرسانة اي يحسن من اداء الخرسانة الطرية وهي قابلية التشغيل وكذلك يقوم بالسيطرة على نمو تشققات الانكماش اللدن اما النوع الثاني فهو يؤدي الى تحسين الخصائص الميكانيكية للخلطة .

*Krenchel* (١٩٨٧) <sup>(٤٦)</sup> و *Kolver* (١٩٩٢) <sup>(٤٧)</sup> إستنتجا أنّ خرسانة الياف الحديد-بولي بروبيلين عندما تهبط (*Settles*) وتنكمش فإنّ هذا يؤدي الى تكوين اجهادات داخلية وهذه الاجهادات تتجه نحو عشرات الملايين من الياف البولي بروبيلين المنتشرة خلال المقطع وبجميع الاتجاهات .

تشققات الهبوط والانكماش تُمنع بسبب ذلك من النمو أو حتى من الظهور بفضل وجود هذه الألياف ، وعدد التشققات لذلك يقل داخليا وخارجيا لخرسانة الألياف المدمجة .

وبينما تتصلب الخرسانة وتسلط عليها الاحمال الخدمية التي قد تتجاوز تحمل الخرسانة ، فإن الياف البولي بروبيلين ذات معامل يونك (*Young's modulus*) القليل يكون من الصعب ان تكون فعالة للسيطرة على التشققات <sup>(٤٨)</sup> وفي الوقت نفسه توجد الياف الحديد ذات معامل يونك (*Young's modulus*) العالي الفعالة في الحد من التشققات . الياف الحديد هذه تعمل كجسر للتشققات الصغيرة في الخرسانة المتشققة ، و تنقل اجهاد التشقق خلال الشق من احدى جهتيه الى الاخرى مما يؤدي الى تقليل تركيز الاجهاد على طرفي الشق وتمنع بذلك نمو الشق <sup>(٤٩)</sup> .

**Kolmos وآخرون (١٩٩٣)** <sup>(٥٠)</sup> أجروا دراسة عملية على الخرسانة المسلحة بالألياف المدمجة تحت الأحمال الساكنة والمتكررة (*Static and Dynamic*) ، وقد تم فحص مكعبات لقياس مقاومة الانضغاط بأبعاد (١٥٠×١٥٠×١٥٠) ملم ومواشير بأبعاد (٤٠٠×١٠٠×١٠٠) ملم لقياس صلابة الانثناء ، نسب الألياف المستخدمة كانت ( حديد + بولي بروبيلين ) هي (١%) حيث ان نسب الياف البولي بروبيلين هي (٠,٢ ، ٠,٣ ، ٠,٥%) وتقابلها الياف الحديد (٠,٨ ، ٠,٧ ، ٠,٥%) على التوالي ، تم فحص المواشير بنقطتي تحميل والمسافة بينهما (١٠٠ ملم).

النتائج المستحصلة من هذه الدراسة بينت أنّ النسبة الامثل لمحتوى الألياف تتأثر بالمحتويات الاخرى للخلطة وكذلك طريقة وخطوات تحضيرها ، وأنّ زيادة نسبة الياف الحديد قد تؤدي الى التكور (*Balling*) وزيادة الياف البولي بروبيلين تؤدي الى كون الخرسانة قاسية وجافة. كذلك بينت النتائج بأن طاقة الكسر ، طاقة الصدم ، الصلابة والمطيلية جميعها تتحسن بإضافة الألياف.

**Stroeve و Qian (٢٠٠٠)** <sup>(٥١)</sup> في دراستهما عن خرسانة الياف البولي بروبيلين-الحديد ، تم قياس مقاومة الانضغاط ، مقاومة شد الانشطار ومعايير الكسر لمختلف الخلطات ذات نسب حجمية مختلفة لألياف الحديد والبولي بروبيلين . تم الحفاظ على نسبة الماء الى السمنت (w/c) ثابتة لكل الخلطات بمقدار (٠,٤) . النتائج بينت بأنه نظرا لكون الألياف تقوم بربط التشققات حتى ولو كانت بمعامل مرونة واطئ فإنها تزيد من مقاومة الخرسانة.

**Bindiganavile و Banthia (٢٠٠١)** <sup>(٥٢)</sup> بحثا في تطبيقات لتصليح وإعادة الترميم باستخدام خرسانة دمج الألياف الكبيرة (*Macro-fiber*) والألياف الصغيرة او الدقيقة (*Micro fiber*) . الألياف الكبيرة المستخدمة تمزج مع نوع متطور من الألياف والذي يكون بطول اقل من (١٠ mm) وقطر اقل من (١٠٠ µm) وهذا الدمج بين النوعين يؤدي الى تقارب الألياف وقلة المسافة بينها وينتج عن هذا تقليل التشققات الدقيقة وزيادة مقاومة الشد .

**Yusof وآخرون (٢٠٠١) <sup>(٥٠)</sup>** بحثوا في الخصائص الميكانيكية للخرسانة الطرية و المتصلبة المعززة بالألياف المدمجة وهي ألياف الحديد ذات النسب الباعية (*Aspect Ratio*) المختلفة ونسب حجمية مختلفة. للخرسانة الطرية تم فحص قابلية التشغيل وللخرسانة المتصلبة تم فحص الانضغاط و مقاومة الانثناء . النسب المستخدمة للألياف هي (٠,٥ الى ١,٥%) اما النسبة الباعية فتتراوح بين (٢٠ الى ١٠٠) . النتائج أظهرت ان الخرسانة ذات الألياف المدمجة ذات النسب الباعية المختلفة ونسبة حجمية مقدارها (١,٥%) المكونة من (٧٠% الياف طويلة و ٣٠% الياف قصيرة ) تعطي اعلى قيمة لمقاومة الانثناء وشد الانشطار ، ومن جانب اخر فان الخرسانة لنفس النسبة الحجمية ونسبة ٣٠% الياف طويلة و ٧٠% الياف قصيرة تعطي اعلى مقاومة انضغاط.

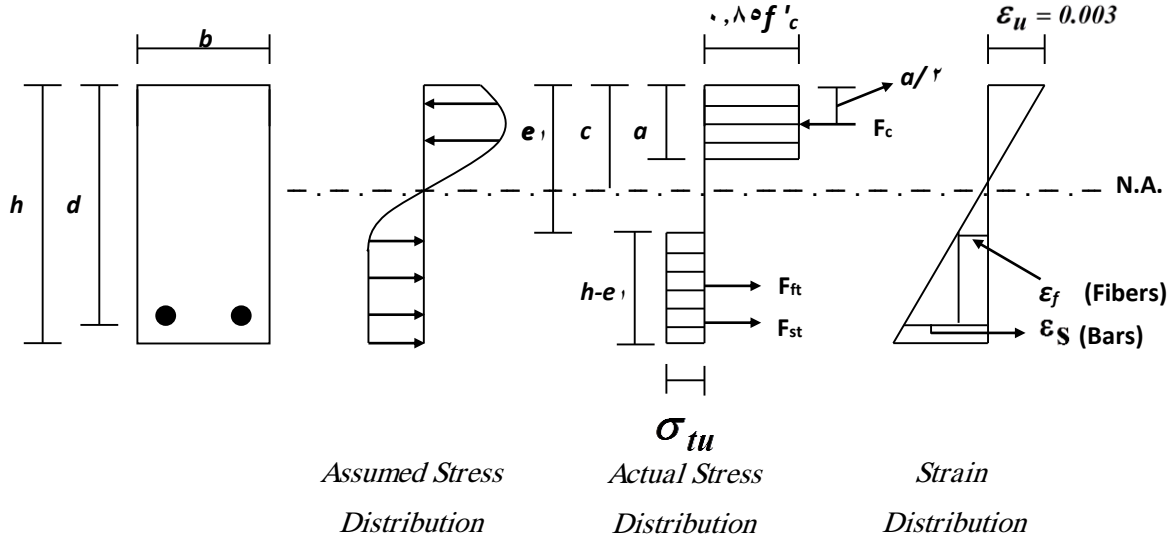
**Lawler وآخرون (٢٠٠٥) <sup>(٥٤)</sup>** درسوا خرسانة الالياف المدمجة وذلك بدمج الالياف الكبيرة (*Macro fiber*) مع الالياف الدقيقة (*Micro fiber*) . الالياف الكبيرة هي الياف الحديد والالياف الدقيقة هي الالياف البلاستيكية (*PVA*) . تم اضافة مادة ملدنة (*Superplasticizer*) الى الخلطات وبنسب مختلفة للحصول على التشغيلية المناسبة وكذلك الاستعاضة عن الاسمنت بالرماد المتطاير بنسبة (١٥%) ليساعد على الانسيابية الجيدة للمزيج .

نتائج البرنامج العملي للبحث بينت ان المتانة لخرسانة الياف الحديد مع (*PVA*) اكبر من تلك التي في خرسانة الياف الحديد لوحدها عند الازاحة اقل من (٠,٥) ملم ، تشققات الانكماش لخرسانة الالياف الدقيقة تتأخر في الظهور مقارنة بخرسانة الالياف الكبيرة ولكن في الاعمار المتقدمة يتكون نفس العدد من التشققات تقريباً . وان استخدام اي نوع من الالياف ذات الترابط الضعيف مع الخرسانة ممكن تحسينه بإضافة الرماد المتطاير او اي مادة لها نفس التأثير . وبصورة عامة تكون الاستفادة كبيرة من مزج الالياف الكبيرة و والدقيقة حيث له تحسينات كثيرة في خصائص الخرسانة ويؤدي الى تقارب الالياف من بعضها واحدهما يقوم بالأداء الذي يفقر اليه الآخر .

## ٤,٤,٢ الدراسات المتعلقة بمقارنة النتائج العملية مع نتائج نظرية

إقترح الباحثان **Henager و Doherty (١٩٧٦) <sup>(٥٥)</sup>**، طريقة لحساب مقاومة الانثناء للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة آخذين بنظر الاعتبار إجهاد الربط بين الألياف والخرسانة (*Bond Stress*)، إجهاد الألياف، النسبة الباعية والنسبة الحجمية للألياف. والشكل (٢-٥) يمثل مخطط توزيع الإجهاد والانفعال لهذه الطريقة والفرضيات الرئيسة للتصميم.

ومن الشكل (٥-٢) وبأخذ العزوم حول نقطة تأثير محصلة اجهادات الانضغاط وجد الباحثان معادلة العزم للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة في منطقة الشد فقط وكما يأتي:



الشكل (٥-٢): الفرضيات الرئيسية للتصميم<sup>(٥٥)</sup>

$$M_{u\circ} = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_{tu} b (h - e_1) \left( \frac{h}{2} + \frac{e_1}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (٢-١)$$

إذ إن:

$\sigma_{tu}$ : مقاومة الشد للخرسانة الليفية بعد التشقق وعبر عنها بالمعادلة الآتية:

$$\sigma_{tu} = 0.7728 \times V_f \frac{l_f}{d_f} \times F_{be} \quad (\text{MPa}) \quad (٢-٢)$$

إذ إن:

$l_f / d_f$ : النسبة الباعية للألياف،  $V_f$ : النسبة المئوية الحجمية للألياف الفولاذية.

$F_{be}$ : معامل كفاءة الربط للألياف وقيمته (١,٠) للألياف المدورة، الملساء والمستقيمة و (١,٢) للألياف ثنائية الشكل (Duo form Fibers).

$e_1$ : المسافة الموضحة في الشكل (٥-٢) ويتم إيجاد قيمتها من تشابه مثلثات الانفعال كما في المعادلة الآتية:

$$e_1 = \left( \epsilon_f \{fibers\} + 0.003 \right) \frac{c}{0.003} \quad (٢-٣)$$

إذ إن:

$c$  : عمق محور التعادل،  $\epsilon_f$  : انفعال الشد في الألياف عند مقاومة العزم النظرية للعتبة وقيمتها كما يأتي :

$$\epsilon_f = \frac{(2\tau_b \times F_{be} \times l_f / d_f)}{E_f} \quad (٢-٤)$$

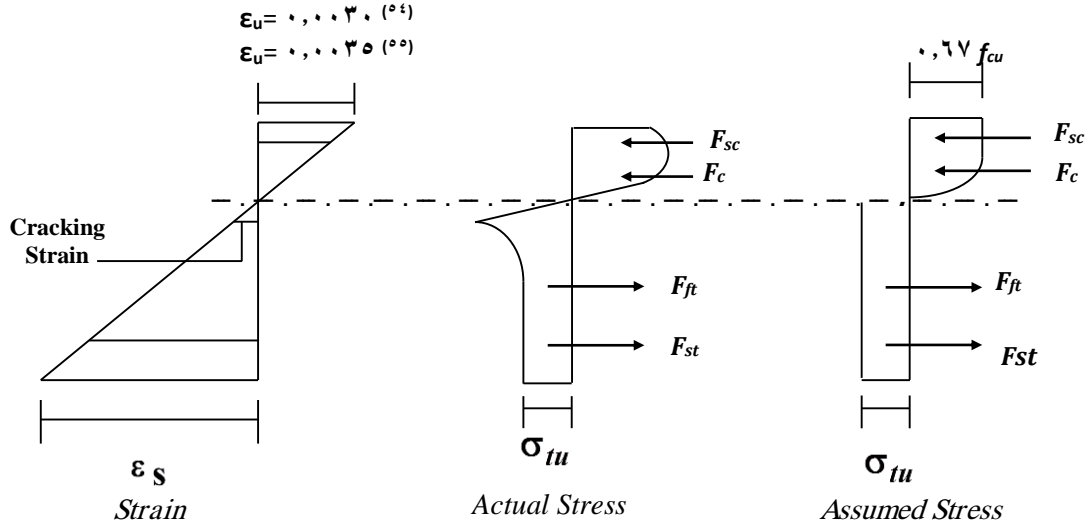
إذ إن :

$\tau_b$  : إجهاد الارتباط للألياف وقد افترض الباحثان أن قيمته مساوية (٢,٣MPa)،  $E_f$  : معامل المرونة للألياف.

وللتأكد من مدى صحة هذه الطريقة فقد قام الباحثان بفحص أربعة نماذج خرسانية بأبعاد مقطع (٣٠٥×٢٠٣mm) ، الأولى مسلحة تسليحاً اعتيادياً بدون ألياف فولاذية والثلاثة الباقية مثل الأولى مع إضافة الألياف الفولاذية بنسب وأنواع مختلفة ومن النتائج العملية التي حصلوا عليها لاحظوا وجود توافق بينها وبين هذه الطريقة، واستنتجوا حصول زيادة في مقاومة الانثناء نتيجة إضافة الألياف الفولاذية إلى الخرسانة الاعتيادية.

قام الباحثان *Al-Ta'an* و *Swamy* (١٩٨١)<sup>(٥٦)</sup> ، بفحص (١٥) عتبة خرسانية بأبعاد مقطع (٢٠٣×١٣٠mm) لبيان تأثير إضافة الألياف الفولاذية إلى الخرسانة الاعتيادية على الأود ومقاومة الانثناء للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة. وقد تم استخدام ثلاث مجاميع من العتبات، الأولى خمس عتبات بخرسانة اعتيادية مسلحة بحديد التسليح الطولي والثانية مثل الأولى مع إضافة الألياف الفولاذية إلى عمق العتبة بأكمله، أما الثالثة فهي تشبه الأولى مع إضافة الألياف الفولاذية إلى عمق معين في منطقة الشد الفعالة للعتبة فقط. وقد استنتج الباحثان وجود زيادة في مقاومة الانثناء للعتبات نتيجة إضافة الألياف الفولاذية ولكن هذه الزيادة كانت هامشية (*Marginal*)؛ إذ كانت أعلى زيادة وصلت إليها المقاومة (١٠,٥%) عند إضافة الألياف الفولاذية بنسبة حجمية تساوي (١%) إلى عمق العتبة بأكمله. ويعد هذا التحسين في مقاومة الانثناء قليلاً مقارنةً بالنقصان الحاصل في الأود قبل مرحلة الخضوع نتيجة إضافة الألياف الفولاذية إلى الخرسانة المسلحة.

كما قام الباحثان باقتراح طريقة لحساب مقاومة الانثناء للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة. والشكل (٦-٢) يوضح توزيع الإجهاد والانفعال لهذه الطريقة وأهم الفرضيات المستخدمة في التصميم.



الشكل (٢-٦): توزيع الإجهاد والانفعال الحقيقي والمفروض عند الفشل<sup>(٥٦)</sup>

إذ إن :

$\sigma_{tu}$  : مقاومة الشد للخرسانة الليلية بعد التشقق وعبر عنها بالمعادلة الآتية:

$$\sigma_{tu} = \eta_o \eta_l \eta_b \times 2\tau_b \times V_f \frac{l_f}{d_f} \quad (٢-٥)$$

$\eta_o$  : عامل التوجيه في الشد، وقد افترض الباحثان أن قيمته تساوي (٠,٤١) للعتبات الحاوية على ألياف فولاذية في كل العتبة و(٠,٦٤) للعتبات الحاوية على ألياف في منطقة الشد الفعالة فقط.  
 $\eta_b$  : عامل يمثل كفاءة ارتباط الألياف مع الخرسانة وعد الباحثان أن قيمته تساوي (١,٢) بالنسبة للألياف المنثنية (Crimped Steel Fiber).

$\tau_b$  : إجهاد الارتباط بين الألياف والخرسانة وقد افترض الباحثان أن قيمته تساوي (٢,٥٨MPa).

$\eta_l$  : عامل التصحيح الطولي المعروف من قبل الباحث Cox<sup>(٥٧)</sup>.

وبأخذ عزوم القوى الداخلية حول محور التعادل وجد الباحثان معادلة لحساب مقاومة الانثناء القصوى كانت كما يأتي:

$$M_{u_o} = F_c (c - k_2) + F_{sc} (c - d') + F_{st} (d - c) + F_{ft} \frac{h - c}{2} \quad (٢-٦)$$

إذ إن :

$F_c$  : قوة الانضغاط الناتجة من الخرسانة .

$F_{sc}$  : القوة الناتجة من التسليح الطولي في منطقة الانضغاط .

$F_{st}$  : القوة الناتجة من حديد التسليح الطولي في منطقة الشد للعتبة .

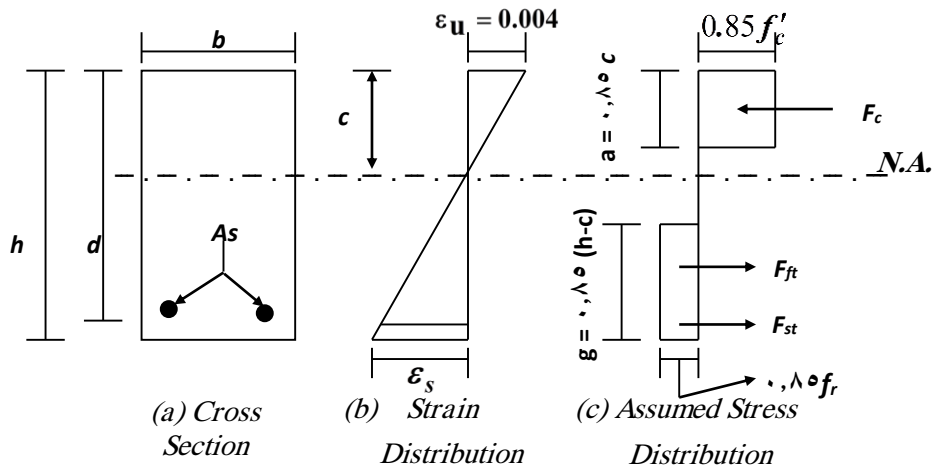
$F_{ft}$  : القوة الناتجة من مقاومة الخرسانة الليفية للشد.

$k_2$  : المسافة من وجه الانضغاط إلى محصلة إجهاد الانضغاط ويعبر عنها بالمعادلة الآتية :

$$k_2 = \left\{ \frac{\left(2 - \frac{\epsilon_o}{\epsilon_u}\right)^2 + 2}{4 \left(3 - \frac{\epsilon_o}{\epsilon_u}\right)} \right\} c \quad (٢-٧)$$

واستنتج الباحثان وجود توافق بين النتائج العملية والنظرية الناتجة من المعادلة (١٤.٢).

أجرى الباحث **Jindal (١٩٨٤)** <sup>(٥٨)</sup> ، دراسة عملية ونظرية حول تأثير الألياف الفولاذية على سلوك العتبات الخرسانية تحت تأثير القص والانثناء. إذ قام الباحث بفحص (٤٤) عتبة خرسانية لدراسة تأثير الألياف الفولاذية على مقاومة القص والانثناء للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة وعلى حالة الفشل (*Mode of Failure*) للعتبات. أما المتغيرات التي أخذت بنظر الاعتبار فكانت نوع الألياف الفولاذية، النسبة الباعية لها ونسبة فضاء القص إلى العمق ( $a_v/d$ ). ولاحظ الباحث وجود زيادة في مقاومة الانثناء والقص نتيجة إضافة الألياف الفولاذية وإن شكل الفشل يتغير من فشل القص الحاصل في العتبات الخرسانية المسلحة إلى فشل انثناء أو انثناء - قص في العتبات الخرسانية الليفية المسلحة. وقد اقترح الباحث طريقة لتحليل وتصميم العتبات الخرسانية الليفية المسلحة عند وجود حمل قص أو انثناء. فيما يتعلق بمقاومة الانثناء، الشكل (٧-٢) يوضح توزيع الإجهاد والانفعال لهذه الطريقة عند المرحلة القصوى وأهم الفرضيات المستخدمة في التحليل والتصميم.



الشكل (٧-٢) : مخطط الإجهاد والانفعال عند الحالة القصوى <sup>(٥٨)</sup>

إن طريقة التحليل المقترحة من قبل الباحث تمثلت بالمعادلات الآتية:

$$f_{rf} = 0.97 f_{rm} (1 - V_f) + 3.41 \times V_f \frac{l_f}{d_f} \quad (٢-٨)$$

إذ إن:

$f_{rf}$  : مقاومة الانثناء للخرسانة الليفية المسلحة التي اقترحت من قبل الباحثين *Swamy and Mangat* <sup>(٥٩)</sup>.

$f_{rm}$  : مقاومة الانثناء للخرسانة الاعتيادية.

ويمكن حساب مقاومة الإنثناء القصوى من المعادلة :-

$$M_{u0} = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + b g \left( 0.85 f_{rf} \right) \left( h - \frac{a}{2} - \frac{g}{2} \right) \quad (٢-٩)$$

$g$  : ارتفاع مستطيل إجهاد الشد المساوي  $(0.85(h - c))$ .

وقد لاحظ الباحث وجود توافق جيد بين النتائج العملية مع النظرية، وقد استخدم الباحث طريقته على نماذج أخرى للباحثين *Swamy and Al-Ta'an* <sup>(٥٦)</sup>، واستنتج وجود توافق بين النتيجةين.

اقترح الباحث *Craig* (١٩٨٥) <sup>(٦٠)</sup>، طريقة لحساب مقاومة الانثناء للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة متمثلة بالمعادلات الآتية:

$$M_{u0} = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_{tu} b \left( h - \frac{a}{\beta_1} \right) \left( \frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (٢-١٠)$$

$$\sigma_{tu} = 0.7 P_f \times N_f \quad (٢-١١)$$

إذ إن:

$a$  : عمق الإجهاد المكافئ ويعبر عنه بالمعادلة الآتية :

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y + \sigma_{tu} b h}{0.85 f'_c b + \frac{\sigma_{tu} b}{\beta_1}} \quad (٢-١٢)$$

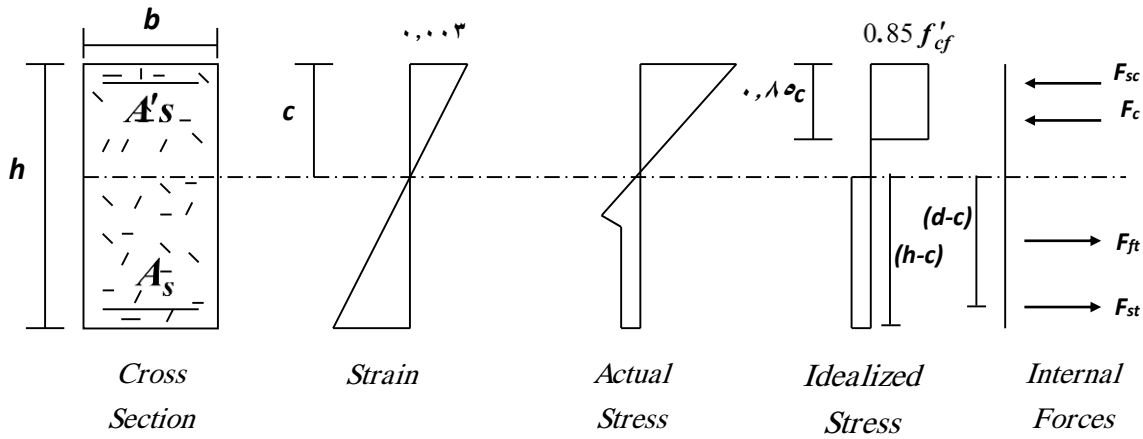
$\beta_1 = (a/c) = (٠,٨٥ - ٠,٦٥)$  اعتماداً على مقاومة الانضغاط للخرسانة،  $p_f$  : قوة السحب (Pullout Force) للليف الواحدة،  $N_f$  : عدد الألياف الفعالة في أي اتجاه لوحدة المساحة ويعبر عنه بالمعادلة الآتية:



$$N_f = \frac{4V_f \times (0.41)}{\pi d_f^2} \quad (٢-١٣)$$

وقد استنتج الباحث بأن إضافة الألياف الفولاذية إلى الخرسانة المسلحة يزيد من مقاومتها للإنشاء ويجعل فشلها مطيلياً ولاحظ بأن حجم الليف و طوله وشكله من أهم العوامل المؤثرة على مقاومة الإنشاء.

قام الباحثان **Soroshian و Reklaoui (١٩٨٩)** <sup>(٦١)</sup>، بتطوير طريقة لإيجاد مقاومة الإنشاء للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة والمستخدم للتصميم والتحليل وكانت كما يوضحها الشكل (٨-٢).



الشكل (٨-٢) : مخطط الطريقة المعتمدة لتحليل الإنشاء <sup>(٦١)</sup>

وبأخذ مجموع العزوم للقوى حول تسليح الشد، تم إيجاد معادلة العزم وكانت كما يأتي:

$$M_{u_o} = F_{sc} (d - d') + F_c \left( d - \frac{a}{2} \right) - F_{ft} \left( d - \frac{(h+c)}{2} \right) \quad (٢-١٤)$$

$$F_{sc} = A'_s f'_s \quad (٢-١٥)$$

$$F_c = 0.85 f'_{cf} \times 0.85 c.b \quad (٢-١٦)$$

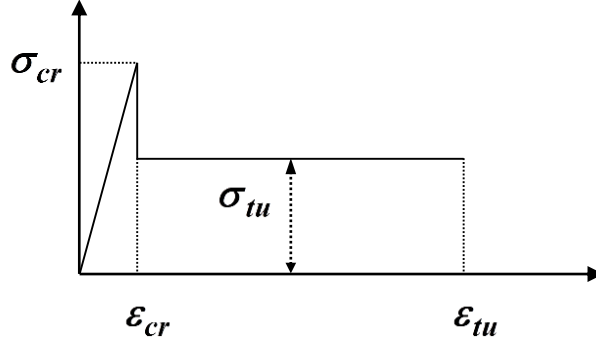
$$F_{ft} = f_{rf} (h - c)b \quad (٢-١٧)$$

إذ إن:

$f'_{cf}$ : مقاومة الانضغاط للخرسانة الليفية،  $f_{rf}$ : مقاومة الإنشاء للخرسانة الليفية.

وللتأكد من مدى صحة هذه الطريقة قام الباحثان بتطبيق هذه الطريقة على (١٠) نماذج مفحوصة عملياً ومنشورة في بحوث سابقة حول الموضوع واستنتجوا وجود خطأ مقداره (١٠٪) عند المقارنة.

قام الباحثان *Ezeldin and Shiah* (١٩٩٥) <sup>(٦٢)</sup> ، باقتراح طريقة لإيجاد مقاومة الانثناء للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة، وسلوك مقاومة الشد للخرسانة الليفية قبل وبعد التشقق كما موضح في الشكل (٩-٢) والمعادلة (٢-١٨).

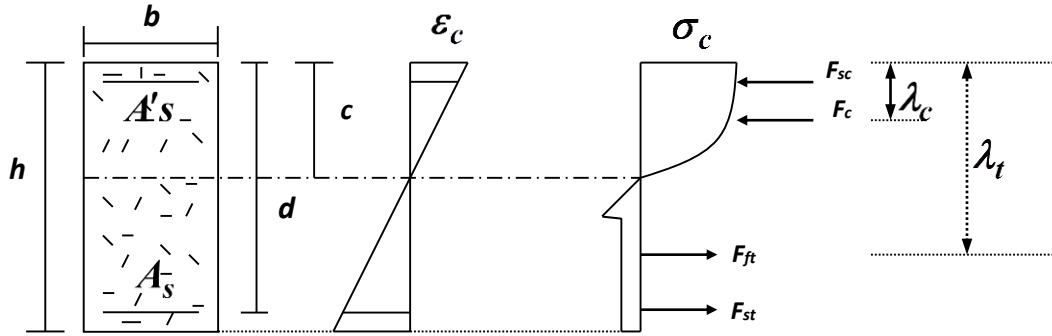


الشكل (٩-٢) : علاقة إجهاد الشد وانفعال الشد للخرسانة الليفية المسلحة <sup>(٦٢)</sup>

$$\sigma_{tu} = 0.772 \times F_{be} \times V_f \frac{l_f}{d_f} \quad (٢-١٨)$$

إذ إن:

$F_{be}$  : عامل كفاءة ربط الألياف الذي تتغير قيمته من (١,٠) إلى (١,٢) اعتماداً على خصائص الألياف. توزيع الإجهاد والانفعال افترض كما موضح في الشكل (١٠-٢).



الشكل (١٠-٢) : سلوك الانثناء للعتبات الخرسانية الليفية المسلحة <sup>(٦٢)</sup>

معادلة التوازن للعزم يمكن إيجادها بأخذ العزم حول الـ ( $F_c$ ) كما يلاحظ في الشكل (١٠-٢).

$$M_{u0} = A_s f_s (d - \lambda_c) + \sigma_{tu} b (h - c) (\lambda_t - \lambda_c) + A'_s f'_s (\lambda_c - d') \quad (٢-١٩)$$

إذ إن:

$f_s$  : إجهاد الشد في حديد التسليح.

$f'_s$  : إجهاد الانضغاط في حديد التسليح.

$\lambda_c, \lambda_t$  : بعد مواقع قوى الشد والانضغاط للخرسانة الليفية عن وجه الانضغاط.

واستنتج الباحثان أن إضافة الألياف الفولاذية إلى الخرسانة المسلحة يزيد من مقاومتها للانثناء ويجعلها مادة مطيلية.

طوّر *Ezzadeen و Al-Ta'an* (١٩٩٢) <sup>(٦٣)</sup> أسلوباً رياضياً بالاعتماد على طريقة العناصر المحددة لتحليل الأعضاء الخرسانية الليفية المسلحة تحت تأثير الأحمال الساكنة المتزايدة حتى الوصول إلى الفشل. العنصر الهيكلي ذو أسلوب الطبقات استخدم لتمثيل المنشأ. تم استخدام علاقة الإجهاد - الانفعال غير الخطية المقترحة من قبل *Lee و Soroushian* <sup>(٦٤)</sup> خضوع حديد التسليح تم أخذه بنظر الاعتبار أيضاً. تم إدخال تأثير السلوك غير الخطي الهندسي. وتم التأكد من دقة هذه النماذج العددية والتي أظهرت توافقاً جيداً عند مقارنتها مع النتائج العملية .

*Ramaswamy و Thomas* (٢٠٠٧) <sup>(٦٥)</sup> ، قاما بإجراء دراسة عملية حول تأثير إضافة الألياف على الخصائص الميكانيكية للخرسانة . المعادلات التي تم اشتقاقها مبنية على أساس ٦٠ فحص لمختلف الخصائص الميكانيكية للخرسانة الليفية ، النماذج المستخدمة في الفحوصات وأبعادها والفحوصات التي تُجرى عليها مبنية في الجدول (٢ - ٢) علماً بأن لكل فحص تم أخذ ٥ نماذج .

جدول (2 - 2) تفاصيل النماذج المعتمدة في الدراسة <sup>(٦٥)</sup>

النماذج المفحوصة	أبعادها (mm)	الفحوصات
مكعبات	١٥٠×١٥٠×١٥٠	مقاومة الإنضغاط للمكعب
أسطوانات	٣٠٠×١٥٠	مقاومة الإنضغاط للأسطوانة ، شد الإنشطار ، معامل المرونة ،نسبة بواسون ، سلوك الإجهاد-الانفعال
مواشير	٥٠٠×١٠٠×١٠٠	معايير الكسر

المتغيرات المأخوذة في هذه الدراسة هي مقاومة إنضغاط الخرسانة وهي [ معتدلة المقاومة (٣٥MPa) ، معتدلة إلى عالية المقاومة (٦٥MPa) و عالية المقاومة (٨٥MPa) ] وقد أُستخدمت ثلاث نسب حجمية للألياف وهي ( ٠ ، ٠,٥ ، ١ ، و ١,٥%) . مقاومة الخرسانة المعززة بألياف الحديد المحسوبة وفقاً للمعادلات في هذا البحث تمت مقارنتها مع النتائج العملية لهذا البحث وبحوث سابقة وبيّنت مدى صحة هذه المعادلات ، هذه الدراسة بينت أن الترابط بين الخرسانة والألياف في المزيج يؤدي إلى تحسين الخصائص الميكانيكية بصورة ملحوظة .