دراسة تجريبية لتأثير توجيه الألياف على خصائص الشد للمواد المركبة المدعمة بألياف الكتان الطبيعية

الباحث: د. ثائر عثمان ومحسن عدره

ملخص:

يهدف البحث المقدم هنا إلى دراسة تأثير توجيه الألياف بزوايا مختلفة على الخصائص الميكانيكية (مقاومة الشد العظمى، معامل المرونة، الاستطالة النسبية عند الكسر) للمادة المركبة. ولأجل هذا الهدف، تم تحضير عينات من مادة مركبة بطريقة القولبة اليدوية مؤلفة من ألياف الكتان الطبيعية وراتنج الايبوكسي بنسب وزنية (20:80, 48:52, 61:39)، وتم توجيه الألياف بزوايا $(0, 30^o, 45^o, 60^o, 90^o)$ عن طريق استخدام آلة القص بالليزر. تشير النتائج الحاصلة إلى أن عينات المادة المركبة المدعمة بألياف الكتان الموجهة بزاوية 0^o تملك أعظم قيمة لمقاومة الشد ومعامل المرونة مع قيم منخفضة للاستطالة مقارنة مع العينات الأخرى، من جهة، وأن نمط الانهيار تحت تأثير حمولة الشد المطبقة يتطابق مع زوايا توجيه الألياف ضمن المادة المركبة، من جهة أخرى.

كلمات مفتاحية: توجيه الألياف– الخصائص الميكانيكية– أنماط الانهيار– حمولة الشد

An experimental Study of fibers orientation effect on the tension properties of composite materials reinforced by natural linens fibers

Abstract

The main objective of this article is to study the influence of fibers orientation on the mechanical properties (ultimate tensile strength, elasticity modulus, elongation) of composite material. To this end, the composite material samples were prepared by using the hand-lay-up method at three weight fractions 20:80, 48:52, 61:39, and the fibers were oriented at 0°, 30°, 45°, 60°, 90° when the samples were cut by using the CO2 laser cutting machine. The results show that the samples with a fiber orientation of 0° had the maximum values of the ultimate tensile strength and Young's modulus, with minimal values to elongation in comparison with other samples, on one hand, and the failure mode corresponds to the angle of fiber orientation within the composite material, on the other hand.

Keywords: fiber orientation, mechanical properties, failure mode, tensile loading .

1. مقدمة:

ينتشر استخدام المواد المركبة حالياً في مختلف المجالات الصناعية، مثل صناعة أنابيب الضغط، صناعة السيارات وصناعة الطائرات، وذلك لما تتمتع به من صفات وخصائص فيزيائية وميكانيكية مثل خفة الوزن والمتانة والمقاومة المرتفعة. بالإضافة إلى مرونة التصميم، إذ يستطيع المهندس أن يصممها بحيث يضع الألياف في اتجاه الأحمال، مما يؤدي إلى استخدام أمثل للمادة، وبالتالي إلى انخفاض أكبر في وزن الإنشاء النهائي.[1]. وكما هو معلوم، تتكون المادة المركبة من ألياف ذات مقاومة وجساءة مرتفعة، مثل الألياف الصناعية (ألياف الزجاج ،ألياف الكربون...الخ) أو الألياف الطبيعية (ذات المصدر الحيواني مثل الصوف ،أو ذات المصدر النباتي كألياف الكتان والقطن على سبيل المثال)، والتي تكون مغمورة في مادة لدنة أو مبلمَرة أو راتنج خفيفة الوزن، مثل البوليستر أو الإيبوكسي، على سبيل المثال، والتي تؤلف القالب أو المادة الرابطة بين الألياف. تعتمد خواص المواد المركبة على خصائص المكونات الداخلة في تركيبها ونسب هذه المكونات من جهة، وعلى شكلها الهندسي وطريقة توزيعها وحجمها واتجاهها، من جهة أخرى،[1]. بالمقابل ، ترتكز غالبية الدراسات المرجعية على دراسة تأثير توجيه الألياف الصناعية كألياف الزجاج و الكربون أو السيراميك على بعض الخصائص الميكانيكية (معامل المرونة- مقاومة الشد- مقاومة التعب...الخ) أو الخصائص الفيزيائية (الموصلية الحرارية والعزل الحراري) للمواد المركبة، [6-2]. بينما تعتبر الدراسات الموجهة على تأثير توجيه الألياف الطبيعية، كألياف الكتان أو القطن

قليلة نوعاً ما، من جهة، ولا تعطي توصيف جيدا لتأثير توجيه الألياف على الخصائص الميكانيكية من جهة أخرى، [8–7]، حيث تقتصر غالبيتها على استخدام طبقة واحدة من الألياف الطبيعية أو دراسة تأثير توجيه الألياف بزاوية 0 أو 90 درجة فقط. مما يستدعي استثمار هذه الألياف الطبيعية ودراسة تأثير توجيها بزوايا مختلفة، وضمن عدة طبقات ضمن المادة الحاضنة، على بعض الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة.

2. أهمية البحث وأهدافه:

في إطار البحث المستمر لتحسين الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة، تأتي أهمية هذا البحث، وذلك بهدف دراسة تأثير زوايا توجيه الألياف ضمن المادة المركبة على الخصائص الميكانيكية من جهة، وعلى شكل الانهيار الحاصل تحت تأثير حمل الشد من جهة أخرى. وذلك من خلال توجيه ألياف الكتان المستخدمة بنسب وزنية مختلفة ضمن المادة الحاضنة (راتنج الايبوكسي) بزوايا $(0, 30^o, 45^o, 60^o, 90^o)$ بالنسبة لاتجاه التحميل المطبق.

3. طرائق البحث ومواده:

3–1: تحضير المواد المركبة:

تم استخدام طريقة القولبة اليدوية في تحضير عينات المواد المركبة المدروسة، وتم استخدام هذه الطريقة لسهولة التصنيع وقلة التكلفة بالمقارنة مع الطرق الأخرى. وتتألف المواد المركبة من:

المادة الحاضنة: وهي مادة الايبوكسي وهي أحد الراتنجات المتصلبة حرارياً وتستخدم في نطاق واسع من التطبيقات الصناعية.

مادة التقوية: نسيج ألياف الكتان من مصدر مصري ومن إنتاج الشركة المصرية للكتان ومشتقاته ، الشكل (1).

المادة المصلبة (المحفزة): وهي عبارة عن سائل شفاف من مادة ميثيل إيثيل كيتون بيروكسيد (MEKP) والتي تستخدم بنسبة 2g لكل 100g من الراتنج، [9]. بعض خصائص المادة الحاضنة ومادة التقوية مبينة في الجدول (1).

الشكل (1): نسيج ألياف الكتان المستخدم كألياف تقوية

الجدول (1):خصائص المادة الحاضنة ومادة التقوية

الايبوكسي			
الكثافة (g/cm^3)	معامل يونغ(GPa)	إجهاد القطع(MPa)	درجة الحرارة للاستعمال القصوى(C^0)
1.2	4.5	130	200-90
ألياف الكتان			
الكثافة الحجمية (g/cm^3)	إجهاد الشد(MPa)	معامل يونغ(GPa)	استطالة القطع(%)
1.5 -3	345	27.6	2.7-3.2

تم تحضير أربع نماذج من العينات الثلاث نماذج الأولى من العينات (بطبقة واحدة ، بطبقتين وبثلاث طبقات من ألياف الكتان) تختلف بإختلاف النسب الوزنية لمادة التقوية، الجدول (2)، باستخدام قالب ذو إطار خشبي بقاعدة زجاجية بأبعاد $mm(\times 400$ 400×4) مطلي بشمع الكروان لضمان إخراج العينات من القالب وعدم التصاقها. بينما النموذج الرابع مكون فقط من الايبوكسي دون ألياف لأعتباره كمرجع للمقارنة (Reference sample).

في البداية يجب قطع ألياف الكتاب بالأبعاد المطلوبة $(400 \times 400)mm$ ، ثم سكب كمية كافية من الراتنج الذي تم تحضيره مسبقاً (خلط كمية 2g من المصلب مع كل

100g من الراتنج خلطاً بطيئاً وتقليبها جيداً باستخدام قضيب زجاجي لمنع تشكل الفقاعات)، ويسكب في القالب كطبقة أساس ويوزع بالفرشاة لضمان انتشاره بشكل متساو على كافة مساحة القالب، ثم يتم الانتظار لتصلب الراتنج، بعدها توضع طبقة من ألياف الكتان، ثم يسكب الراتنج في القالب بشكل موحد ويتم توزيعه باستخدام الفرشاة من أجل الحصول على الترابط المطلوب، مع الانتباه جيداً لمنع تشكل فقاعات الهواء اثناء تحريك الفرشاة، ثم توضع الطبقة الثانية من ألياف الكتان، ثم يسكب الراتنج ويوزع جيداُ وتتكر العملية حتى الحصول على ثلاث طبقات لألياف الكتان (النموذج الثالث). بينما لأجل النموذج الثاني فتوضع طبقتان من ألياف الكتان، وتوضع طبقة واحدة فقط لأجل النموذج الأول. بعد الانتهاء من تحضير النماذج تترك لمدة 24 ساعة دون تحريك ليتم تصلبها بشكل نهائي، ثم بعد ذلك يتم إخراجها من القوالب.

الجدول (2): نماذج عينات المواد المركبة المحضرة

النماذج	نسبة الألياف (مادة التقوية)	نسبة الراتنج
النموذج الأول	**20% – طبقة واحدة**	**80%**
النموذج الثاني	**48% – طبقتان**	**52%**
النموذج الثالث	**61% – ثلاث طبقات**	**39%**
النموذج الرابع (RS)	**0%**	**100%**

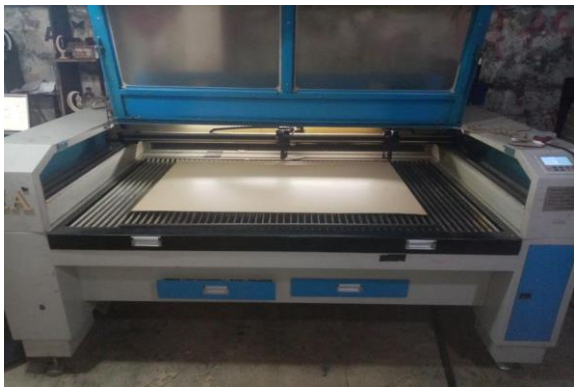
3-2: تحضير عينات الشد:

بهدف الحصول على زوايا مثالية لتوجيه الألياف ضمن عينات الشد بالزوايا المطلوبة للدراسة $(0, 30^o, 45^o, 60^o, 90^o)$، من جهة ، ولضمان حواف مصقولة لإزالة أي عدم إنتظام في العينات، تم قطع العينات باستخدام آلة القص بالليزر CO2 Laser ، الشكل (2) والتي تشبه في عملها عمل الطابعة، حيث يوجد جهاز كمبيوتر مرفق مع الآلة والتي تقوم بقص جميع التصاميم التي يتم تنفيذها في برامج الرسم الهندسي. حيث تم قص عينات الشد وفق الخطوات الآتية:

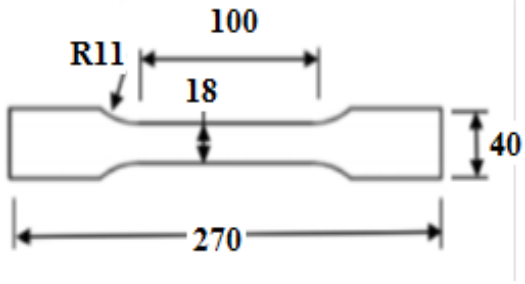
- رسم النموذج الخاص بعينات الشد بالأبعاد $(240 \times 40 \times 4)mm$ وفق معيار ASTM D3039/D3039M- 17, 2017, الشكل (3)، باستخدام برنامج Solidworks ، الشكل (4)، حيث يضمن النموذج زوايا توجيه الألياف المطلوبة، ثم حفظ النموذج وتصديره بصيغة DFX إلى برنامج CorelDRAW.
- وضع عينات المواد المركبة التي تم تحضيرها على سطح طاولة الآلة ، الشكل (5).
- نقوم بإدخال البارامترات المطلوبة للقطع والخاصة بالآلة (شعاع الليزر وقوته). حيث تم استخدام البارامترات الآتية،[10]: استطاعة الليزر 40% من استطاعة

الآلة، سرعة القطع 5mm/sec ، البعد بين فوهة خروج الليزر والعينات 26mm .

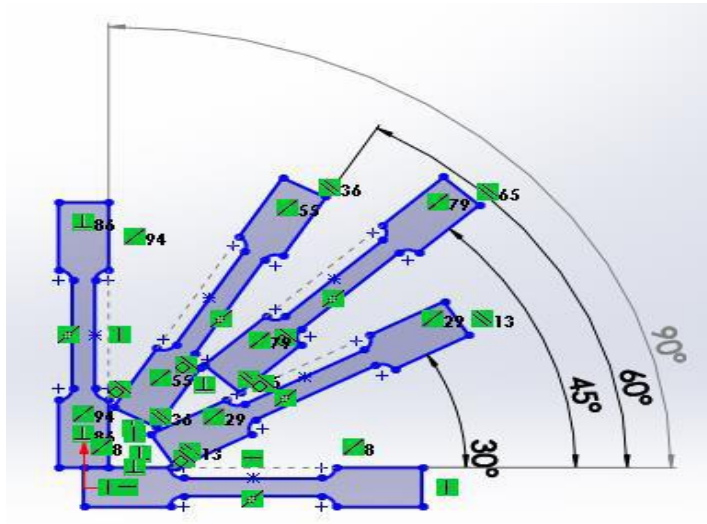
- إرسال مهمة الطباعة إلى نظام الليزر للقيام بمهمة القص.



الشكل (2): آلة القص بالليزر المستخدمة



الشكل (3): أبعاد عينات الشد وفق معيار ASTM



الشكل (4): نماذج عينات الشد المجهزة للقص بالليزر

الشكل (5): قص العينات باستخدام آلة القص بالليزر

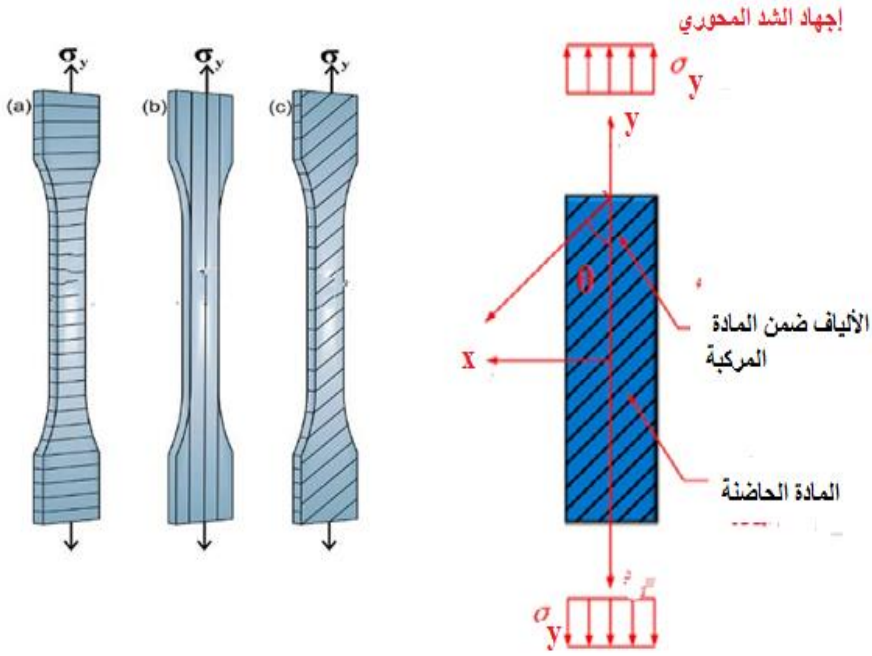
بعد القيام بتحضير بقص عينات الشد المطلوبة، ثم إجراء معالجة حرارية لاحقة، حيث وضعت العينات في فرن المعالجة الحرارية من نوع Memmert ألماني الصنع (متواجد

الجهاز في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين) عند درجة حرارة $90\ C^o$ لمدة ساعتين. وذلك بهدف الحصول على تصلب أفضل للعينات، **الشكل (6)**.

الشكل (6): فرن المعالجة الحرارية لعينات الشد

بعد الانتهاء من عملية المعالجة الحرارية، تم إجراء اختبار الشد على آلة الاختبار العامة (servo hydraulic – IBMU4-100) المتواجدة في مخابر كلية الهندسة

الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين. من خلال إجراء ثلاث اختبارات لكل عينة مدروسة ثم أخذ القيمة المتوسطة للعينات الثلاث لكل بارامتر مدروس. حيث يظهر الشكل (7) اتجاه التحميل بالنسبة لتوجيه الألياف وفق اختبار الشد للعينات.



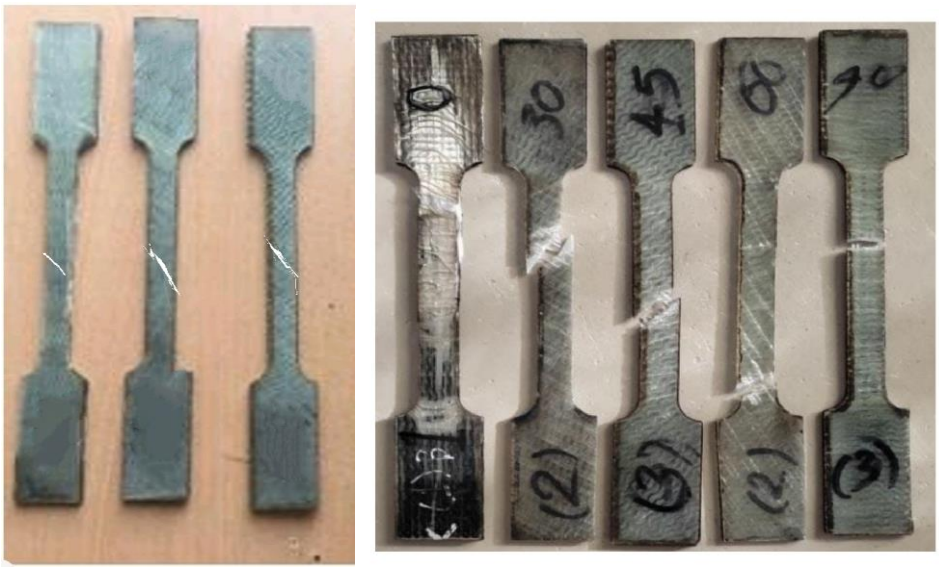
الشكل (7): اتجاه التحميل في اختبار الشد (وفق المحور y) للعينات الموجهة أليافها بزوايا مختلفة

$$(\boldsymbol{a}: \boldsymbol{\theta} = \mathbf{90}^{\boldsymbol{o}},\ \mathbf{b}: \boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}^{\boldsymbol{o}}\ ,\boldsymbol{c}: \ \mathbf{90}^{\boldsymbol{o}} > \boldsymbol{\theta} > \mathbf{0}^{\boldsymbol{o}})$$

4. النتائج والمناقشة:

4.1: أنماط الانهيار:

يظهر الشكل (8) طريقة الانهيار الحاصلة في عينات الشد، حيث يمكننا ملاحظة بأن حافة الكسر للعينات المدعمة بالألياف موجهة على امتداد زاوية توجيه الألياف، الشكل (8–B)، مقارنة باستثناء العينات الموجهة بزاوية 0 درجة. بينما للعينات الغير مدعمة بالألياف الشكل (8–A)، فأن حافة الكسر تتناسب مع اتجاهات مستويات الانزلاق في المادة، حيث تعتبر العينات المرجعية كعينات مؤلفة من مادة واحدة يتوافق سلوك أنهيارها مع سلوك المواد القصفة. وهذه النتائج تتطابق مع النتائج التجريبية الموجودة في المراجع العلمية [11–15]



A B

الشكل(8): أنماط الانهيار الحاصل في عينات الشد (الرقم في الأعلى يشير لزاوية توجيه الليف، وفي الأسفل لعدد الطبقات).

A: العينات المرجعية (غير المدعمة بالألياف). B: العينات المدعمة بالألياف

ويمكن تفسير ذلك بأن مقاومة السطح البيني بين المادة الحاضنة والألياف تؤثر بشكل كبير على صلابة ومقاومة المادة المركبة. فكلما زادت مقاومة السطح البيني زادت صلابة ومقاومة المادة المركبة، وكلما زادت طاقة السطح البيني كانت المادة المركبة أكثر مطيلية. فالعينات الموجهة أليافها بزاوية تختلف عن الصفر ($30^o.45^o,60^o,90^o$) يبدأ تشكل الشقوق الميكروية على السطح البيني بين الطبقات، وتحت تأثير الشد الناظمي أو القص عند حدود طبقتين من المادة يحدث كسر بشكل مائل على السطح البيني بزاوية تساوي زاوية توجيه الليف في العينات، وبالتالي الانهيار يحدث في السطح البيني والذي يعتبر الجزء الأضعف في المادة المركبة [1]. بينما في العينات الموجهة أليافها بزاوية تساوي الصفر (باتجاه التحميل)، تبدأ الشقوق الميكروية بالظهور في الطبقات الخارجية وينتشر الشق باتجاه متعامد على اتجاه التحميل، ويتطور الشق مسبباً بحدوث كسر في المادة الحاضنة فتنهار العينة.

بينما ب

4.2: نتائج اختبار الشد:

يظهر الجدول (3) نتائج اختبار الشد للعينات المدروسة ضمن سرعة شد قدرها 0.05m/sec وقوة الشد 2KN ، حيث تعتبر العينة الخالية من الألياف (تحتوي 100% من الأيبوكسي) كعينة مرجعية لأجل مقارنة النتائج ودراسة تأثير توجيه زوايا

الليف على الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة. تم إجراء اختبار الشد للعينات المدروسة

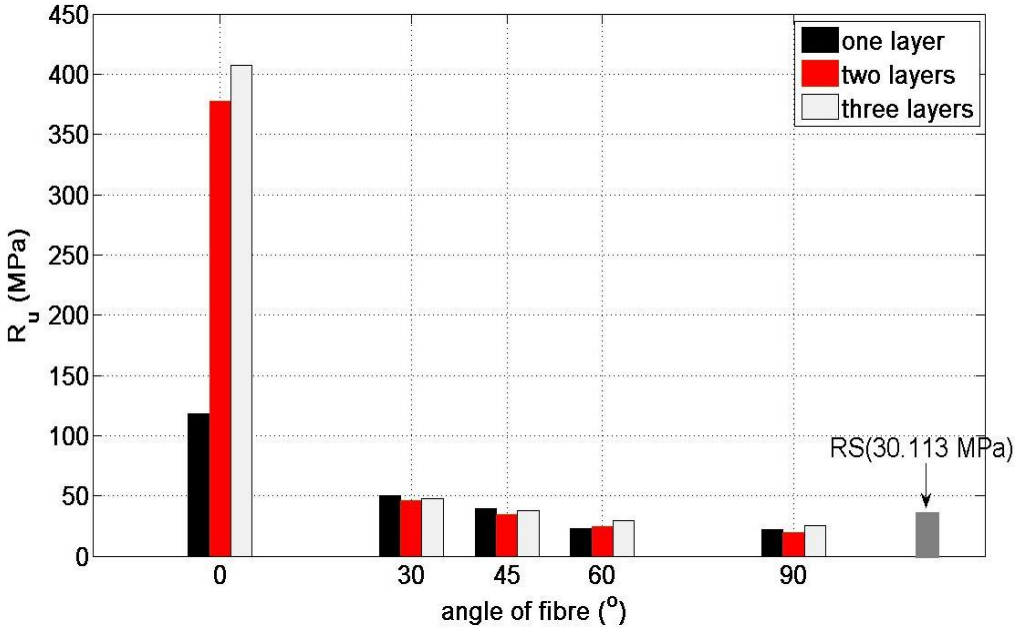
الجدول (3): نتائج أختبار الشد للمواد المركبة

عدد الطبقات من الألياف	زاوية توجيه الليف	حمولة الكسر *(KN)*	مقاومة الشد العظمى $R_u\ (MPa)$	معامل المرونة $E\ (GPa)$	استطالة الكسر $\delta\ (\%)$
طبقة واحدة (نسبة الألياف 20%)	0^0	8.967	118.120	10.114	0.1433
	30^0	3.226	49.992	8.644	0.3587
	45^0	2.873	39.367	6.887	0.4688
	60^0	2.003	22.495	5.104	0.3110
	90^0	2.044	21.708	3.193	0.3002
طبقتان (نسبة الألياف 48%)	0^0	19.741	377.554	22.841	0.0821
	30^0	2.311	45.671	17.487	0.3781
	45^0	1.676	34.699	15.543	0.5194
	60^0	1.549	24.781	13.113	0.4051
	90^0	1.600	19.073	9.4918	0.3673
ثلاث طبقات (نسبة الألياف 61%)	0^0	23.112	407.114	24.566	0.1576
	30^0	2.977	47.833	18.791	0.4522
	45^0	2.265	37.811	16.334	0.6114
	60^0	1.995	29.007	14.621	0.4626
	90^0	1.468	25.566	11.071	0.5422
0% من الألياف 100% أيبوكسي (RS)		3.017	30.113	4.998	1.2407

بينما تظهر الأشكال (9)، (10)، (11) تأثير زاوية توجيه الليف بيانياً على مقاومة الشد العظمى R_u ، على معامل المرونة (معامل يونغ) E، وعلى الاستطالة حتى الكسر δ على الترتيب.

تظهر العينات الموجهة أليافها بزاوية تساوي الصفر مقاومة شد عظمى مقارنة بالعينات الموجهة أليافها بزوايا لا تساوي الصفر، الشكل (9)، حيث تتوضع القيم العظمى عند زاوية توجيه الليف 0^o وتزداد قيمهما بزيادة عدد الطبقات من الألياف. ويمكن تفسير ذلك بسبب أن حمولة الشد عند الزاوية 0^o تنتقل على طول الألياف بشكل موازي لاتجاه التحميل، حيث يكون للألياف الدور الأساسي والمهيمن في تحديد مقاومة وصلابة للمادة المركبة. بالمقابل، وعند زيادة زاوية توجيه الألياف تبدأ قيم مقاومة الشد بالانخفاض ليصبح تأثير عدد الطبقات وزاوية توجيه الألياف قليل التأثير وذلك عند القيم المساوية والأكبر لزاوية توجيه الألياف 45^o. وذلك نتيجة لتأثير الشقوق المتكونة على السطح البيني بين الألياف والمادة الحاضنة والتي تسبب في الانهيار. إضافة لذلك، يمكننا ملاحظة أن مقاومة الشد عند الزوايا 60^o و 90^o تصبح أقل بنسبة (9 – 14)% مقارنة بقيم العينات غير المدعمة بالألياف (100% أيبوكسي – العينة المرجعية *RS*) مما يمكننا الاستنتاج أن السلوك الميكانيكي للمواد المركبة يعتمد بشكل كبير على زاوية توجيه الليف، وأن الألياف الموجهة بزوايا أكبر من 45^o تنقص مقاومة الشد للمادة المركبة، كما أن الألياف في هذه الحالة لا تؤدي سوى دور مادة حشو في

المادة الحاضنة، مع إنقاص في مقاومة الشد العظمى. هنا تكمن أهمية توجيه الألياف وفق متطلبات التحميل للمادة لرفع مقاومتها لأن تغير صغير في اتجاه الألياف بالنسبة للحمل يمكن أن يخفض بشكل ملموس مقاومة المادة المركبة ويسرع في عملية الأنهيار.

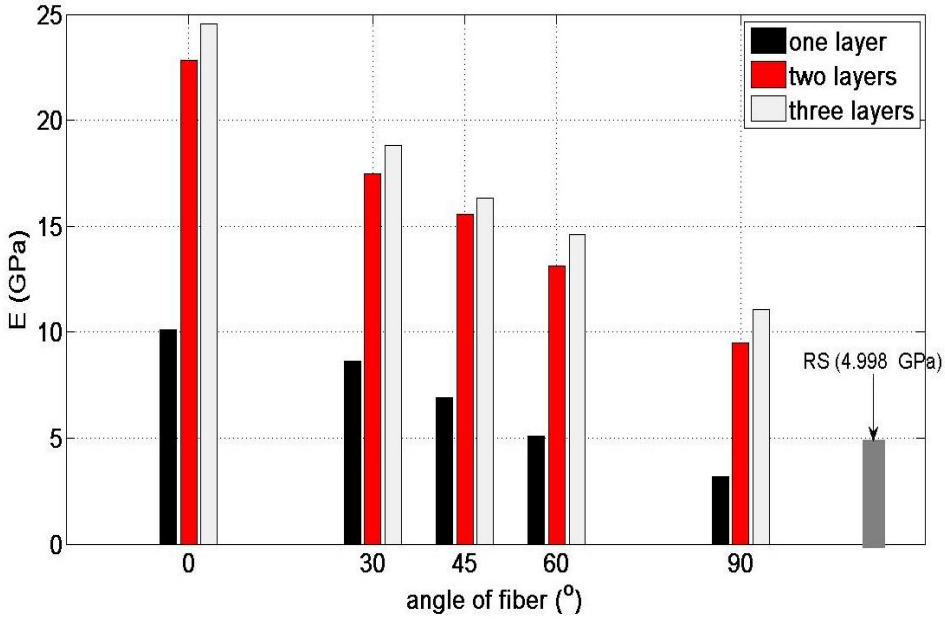


الشكل (9): تأثير زوايا توجيه الألياف على مقاومة الشد القصوى R_u

هذا السلوك لتأثير زاوية توجيه الألياف على مقاومة الشد يكون مماثل لحد ما لتأثيره على قيم معامل المرونة (معامل يونغ)، الشكل (10)، حيث نلاحظ أن زيادة عدد الطبقات يساهم في رفع قيمه (رفع قيمة صلابة المادة) وبالأخص عند زاوية توجيه الألياف 0^o،

وعند زيادة قيم زوايا التوجيه تبدأ قيمه بالانخفاض. أي تصبح المادة المركبة أكثر مرونة، ولكن تبقى أعلى من قيمة معامل المرونة للمادة غير المدعمة بالألياف باستثناء العينات المكونة بطبقة واحدة من الألياف والموجهه بزاوية أكبر من 60^o، في هذه الحالة لا تؤدي الألياف الموجهة أي دور في التقوية وإنما تنقص من قيم صلابة المادة.

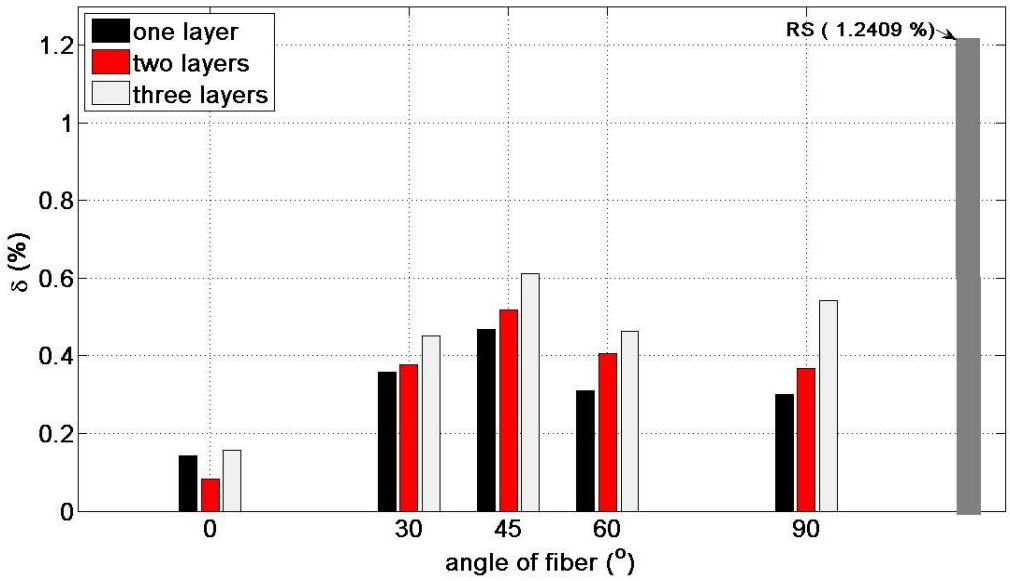
مع ازدياد ميل الألياف عن محور التحميل، يقل دورها في نقل الحمولة وتصبح المادة الحاضنة هي التي تتحمل الجزء الأكبر من الحمل. لذلك ينخفض كل من مقاومة الشد العظمى ومعامل المرونة، وتنشأ الشقوق في السطح البيني بين الألياف والمادة الحاضنة، لكون المادة الحاضنة أكثر قابلية للتشوه من جهة، وتحتوي على فقاعات وعيوب ناتجة عن عملية التشكيل من جهة أخرى. لذلك تنتشر الشقوق على طول زاوية توجيه الألياف، انظر الشكل (8). لأجل هذا فأن تأثير انسلاخ الطبقات بين الألياف والمادة الحاضنة يلعب الدور الأكثر أهمية ويؤدي إلى تناقص قيم مقاومة الشد ومعامل المرونة نتيجة لحمولة الشد المطبقة، [15-17].



الشكل (10): تأثير زوايا توجيه الألياف على قيمة معامل المرونة E (معامل يونغ)

بالمقابل لما ذكر سابقاً، فأن القيم المطلقة للاستطالة النسبية عند الكسر تكون أقل للعينات المقواة بالألياف مقارنة مع قيمتها للعينات غير المدعمة بالألياف، الشكل (11)، مع ملاحظة أن القيم العظمى للاستطالة للعينات المقواة بالألياف تتوضع عند زاوية توجيه لليف قدرها 45^{o} . كما هو معلوم، فأن الاستطالة النسبية للعينات تنخفض عند زيادة صلابة المادة بإضافة ألياف التقوية. ونتيجة لارتفاع قيم معامل المرونة عند تدعيم المادة بالألياف (ارتفاع في الصلابة) فأن المادة تصبح أكثر هشاشة وأقل قابلية للتشوه

والتي تنكسر عند انفعال منخفض . عند توجيه الألياف بزوايا أكبر أو تساوي 45^{o} تصبح المادة أكثر ليونة، وبسهل تشوه المادة وبالنتيجة قيم أكبر للاستطالة.



الشكل (11): تأثير زوايا توجيه الألياف على الاستطالة النسبية عند الكسر δ

5. الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث دراسة السلوك الميكانيكي للمواد المركبة المدعمة بألياف الكتان الطبيعي تحت تأثير حمولة الشد المحورية. من خلال دراسة تأثير زاوية توجيه الألياف على بعض الخصائص الميكانيكية. حيث يمكننا استنتاج الآتي:

- تتطابق أنماط الانهيار من ناحية اتجاه الكسر مع زوايا توجيه الألياف ضمن المادة المركبة، باستثناء العينات الموجهة أليافها بزاوية 0^o درجة والتي ينتشر الشق باتجاه متعامد على اتجاه التحميل.
- تظهر العينات الموجهة أليافها بزاوية 0^o درجة قيم مرتفعة لمقاومة الشد العظمى ومعامل المرونة، مع قيم منخفضة جداً للاستطالة النسبية عند الكسر، مقارنة بالعينات الأخرى الموجهة أليافها بزوايا $30^o.45^o,60^o,90^o$. حيث أن ازدياد ميل الألياف عن محور التحميل، يقل دورها في نقل الحمولة وتصبح المادة الحاضنة هي التي تتحمل الجزء الأكبر من الحمل.
- عند توجيه الألياف بزوايا أكبر أو تساوي 45^o تصبح المادة المركبة أكثر ليونة. وبالنتيجة قيم أكبر للاستطالة النسبية.
- يجب توجيه الألياف وفق متطلبات التحميل للمادة لرفع مقاومتها، لأن تغير صغير في ميلان الألياف بالنسبة لاتجاه التحميل يساهم في تناقص مقاومة المادة المركبة ويسرع من أنهيارها.

وبناء على ذلك فأننا نوصي:

- بدراسة تأثير زوايا توجيه الألياف على السلوك الديناميكي (الاهتزازي) للمواد المركبة. بهدف تحديد التموضع الأمثل لليف والذي يساهم في تخميد الاهتزازات.

- استخدام أنواع أخرى من الألياف الطبيعية كألياف القطن ، أو الألياف الصناعية (ألياف الزجاج أو الكربون) لدراسة تأثيرها على الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة
- دراسة تأثير التقوية بألياف ثنائية وثلاثية التوجه على الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة.

6: المراجع:

[1] CAMPBELL, F2010-Structural Composite Materials. ASM International, First printing, United States of America,629P.

[2] SUBHEDAR, K, M, ; CHAUHAN G,S,; SINGH B, P,2020 - Effect of fiber orientation on mechanical properties of carbon fibre composites. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences.Vol. 27, 1100-1103.

[3] MRZLJAK S; ZANGHELLINI ,B; GERDES ,L; HELWING ,R; SCHULLER ,R; SINN ,G; LICHTENEGGER, H; WALTHER, F AND RENNHOFER,H,2023-Effect of carbon nanofibre orientation on fatigue properties of carbon fiber-reinforced polymers. Journal of Composite Materials, Vol. 57(6) 1149–1164.

[4] ALAM,A,. AFIQUZZAMAN,R , AND RAHAT R, A.2022-Impact of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Rice Straw-Glass Fiber Reinforced Polymer Composites. IEOM Society International. **3340-3350.**

[5] BAKIR, B, HASHEM ,H.2022-Effect of Fiber Orientation for Fiber Glass Reinforced Composite Material on Mechanical Properties. International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME) Vol 1, (5).341-345.

[6] RAMAM, R,S, ; PADA K, T, B .2021-Effect of fiber orientation on the mechanical properties of natural fiber epoxy reinforced composites of Flax, Hemp, and Kenaf. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration, Vol 9(86),72-81.

[7] Mahmoudi. S, Kervoelen. A, Robin. G, Duigou. L, Daya. EM Cadou. JM, Experimental and numerical investigation of the damping of flax-epoxy composite plates, Composite Structures, 2018

.[8] Ömer Y, Bozkurt. MB, Özkan. Ö, Effect of Fibre Orientations on Damping and Vibration Characteristics of Basalt Epoxy Composite Laminates, Proceedings of the World Congress on Civil Structural and Environmental Engineering, 2016.

[9] DODDI, P 2021 -Effect of Orientation of Basalt Fiber Skin on Damping Performance of PALF/Epoxy Hybrid Composites, Journal of Natural Fibers, Vol 19, no14,7414-7423 .

[10] NUGROHO,G2018-Investigation of Agel Leaf Fiber/Unsaturated Polyester Composite Cutting Parameters using CO2 Laser, International Conference on Science and Technology (ICST), Indonesia,28P.

[11] DODDI, P 2020- Effect of fiber orientation on dynamic mechanical properties of PALF hybridized with basalt reinforced epoxy composites, Materials Research Express, VOL 7,NO 1,1-13.

[12] KADIOGLU, 2020F - Performance of Fibre-Reinforced Polymer Composite with Ply-Angle Orientations for Structural and Vibratory Applications,International Journal of Astronautics and Aeronautical Engineering, DOI: 10.35840/2631-5009/7531 ,1-12.

[13] CORDIN,M 2018- Effect of fibre orientation on the mechanical properties of polypropylene–lyocell composites, Open Access Springer,VOL 25:NO 7197–7210,1-13.

[14] MARTIN-BARRERA,C2018- Dimensional Scaling and Failure Pattern of the Tensile Properties of Angle-Ply Thermoplastic Composites of Twaron Fiber/Polypropylene. Frontiers in Materials,VOL 5,NO 36,1-11.

[15] YAO ,T2020- A novel generalized stress invariant-based strength model for inter-layer failure of FFF 3D printing PLA material, Materials and Design,VOL 193 NO 49,1-10.

[16] ZOU R, XIA, Y 2016- Shan,. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material, Composites Part B,VOL 99, 506-513.

[17] SAPUAN, S2020- Mechanical Properties of Longitudinal Basalt / Woven –Glass –Fiber -reinforced Unsaturated Polyester-Resin Hybrid Composites, mdpi polymers journal,VOL 12 ,NO 10,1-10.