

Failure Study on Tensile Strength of Fiberglass Reinforced Polymeric Composite Laminates

Dr. Latifa Al Hamwi*

Dr. Mohamad Khair Mohamad**

Hiba F.Rommiyah***

(Received 15 / 1 / 2023. Accepted 8 / 6 / 2023)

□ ABSTRACT □

In this paper, the failure of polymeric composite laminates made of unsaturated polyester reinforced with glass fibers was studied when loading on tensile to failure, for different types of glass fibers in order to extrapolate the values of tensile loads to failure and to study the deformation and failure patterns that occur. To achieve this goal, a group of samples was prepared from unsaturated polyester material as a polymeric basis and glass fiber as a reinforcement material, where three types of fibers were used (Mat, Mesh, Unidirectional Fiberglass), and these samples were subjected to a tensile test.

Experimental results showed that samples reinforced with oriented glass fibers are more bearing for tensile forces than plates with random fibers, also thickness of samples effect on values and form of failure. Samples upon collapse recorded different and complex patterns of damage and deformation, which increase with the number of layers and vary according to the type of fiberglass used. The experimental results were verified programmatically using Matlab.

Keywords: Unsaturated Polyester Resin – Fiber glass-polymeric composite laminates

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Associate Professor– Design and Production Department –Mechanical and Electrical Faculty– Tishreen University – Lattakia– Syria. Latifaal-Hamwi@gmail.com

** Assistant Professor- Design and Production Department - Mechanical and Electrical Faculty– Tishreen University - Lattakia– Syria. mmohamadkheir@yahoo.com

*** Postgraduate Student (Master) – Design and Production Department – Mechanical and Electrical Faculty – Tishreen University– Lattakia– Syria.

دراسة الفشل على الشد لصفائح طبقية بوليميرية مركبة مسلحة بألياف زجاجية

د. لطيفة الحموي*

د. محمد خير محمد**

هبة رومية***

(تاريخ الإيداع 15 / 1 / 2023. قُبِلَ للنشر في 8 / 6 / 2023)

□ ملخص □

في هذا البحث تم دراسة فشل ألواح صفائحية طبقية بوليميرية مركبة مصنوعة من البولي استر غير المشبع المسلح بالألياف الزجاجية عند التحميل على الشد، من اجل انواع مختلفة من الاليف الزجاجية بهدف استقراء قيم حمولات الشد حتى الفشل ودراسة أنماط التشوه والانهييار الحاصلة. ولتحقيق هذا الهدف تم تحضير مجموعة من العينات من مادة البولي استر غير المشبع كمادة أساس بوليميرية والألياف الزجاجية كمادة تدعيم حيث استُخدمت ثلاثة أنواع من الألياف هي (العشوائية(Mat)، الشبكية(Mesh)، الألياف الموجهة أحادية الاتجاه (Unidirectional Fiberglass)، ثم أخضعت هذه العينات لاختبار الشد.

بينت النتائج التجريبية بأن العينات المدعمة بألياف زجاجية موجهة أكثر تحملاً لقوى الشد مما عليه في الصفائح المركبة ذات الاليف العشوائية كما بينت النتائج أيضاً أن سماكة العينات تؤثر على شكل وقيم الفشل. سجلت العينات عند الانهييار أنماطاً معقدة ومختلفة للضرر والتشوه والتي تزداد بازدياد عدد طبقات الصفيح وتختلف باختلاف نوع الألياف الزجاجية المستخدمة. تم التأكد من النتائج التجريبية برمجياً باستخدام Matlab.

الكلمات المفتاحية: البولي استر غير المشبع - الصفائح الطباقية البوليميرية المركبة - الألياف الزجاجية.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ مساعد - قسم التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Latifaal-Hamwi@gmail.com

**مدرس - قسم التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

mmohamadkheir@yahoo.com

*** - طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

من اجل مواكبة التطور الحاصل في الصناعات التكنولوجية المتقدمة وتحديدًا فيما يخص مجال الهندسة الميكانيكية تم الاتجاه إلى المواد المركبة وخاصة الطباقية لتمتعها بخواص ميكانيكية عالية دفعت بها إلى أعلى القائمة وجعلتها العنصر المفضل المستخدم في معظم التطبيقات الهندسية وذلك نتيجةً للحاجة المتزايدة لظهور مواد جديدة تتمتع بكفاءة عالية في التطبيقات التي يتطلب منها تحمل قيم عالية من الحمولات المطبقة قبل حدوث الفشل وتكون بديلاً عن السبائك ذات الأساس المعدني. [3]

أهمية البحث وأهدافه:**1- أهمية البحث:**

تكمن أهمية البحث في إمكانية الحصول على بني صفائحية طبقية مركبة تحقق خواصاً ميكانيكية مميزة بالإضافة إلى الوزن الخفيف والتكلفة المنخفضة نسبياً واستقرار قدرتها على تحمل حمولات الشد قبل أن يحدث الفشل وإمكانية التنبؤ بهذا الفشل وتحليل سلوكه باستخدام معادلات التصفيح التقليدية عند تعرض هذه البني لحمولات الشد إذ تتمثل هذه الأهمية في إمكانية زيادة استخدام هذه البني في التطبيقات المختلفة كالبخرية والانشائية وغيرها. [9]

2- هدف البحث:

دراسة حمولات الفشل لصفائح طبقية بوليميرية مركبة على الشد وذلك من خلال:

- دراسة تأثير عدد الطبقات ونوع الألياف على قيم حمولات الفشل وأنماطه.
- التأكد من القيم التجريبية برمجياً وإمكانية التنبؤ بها.

3- الدراسة المرجعية:

تؤكد معظم الدراسات أن ألواح المواد المركبة الصفائحية تستخدم على نطاق واسع للحماية ضمن المجالات المتعددة وذلك لما تمتلكه من قدرة على امتصاص الطاقة وتبديدها من خلال أطوار معقدة من الضرر والتشوه.

فقد قام الباحث P K PARHI [1] بتحليل سلوك الفشل في الرقاقت الصفائحية ذات الطبقات المتعددة التي تقع بشكل عشوائي وتخضع للتحميل الثابت عند حمولات الشد، وقام بإجراء الدراسة لحالات مختلفة من حمولات الشد عن طريق تغيير حجم الصفيح وعدد عمليات التصفيح وكذلك تسلسل التراص والظروف الحدية (Boundary conditions) وتوصل إلى أن حالات التحميل المختلفة تؤثر على صلابة الصفيح مما يقلل من متانته ويؤدي إلى حدوث الفشل الهيكلي في البنية التصميمية، ونتيجة تعقيد عملية تحليل سلوك فشل عدد من الرقاقت الطباقية تحت تأثير حالات التحميل الشدية بسبب عملية التوزيع غير المنتظمة للإجهادات في الصفائح المركبة تم إيجاد نموذج بسيط لتطوير إجراء تحليل العناصر المنتهية لعدد من الصفائح الطباقية.

كما وأجرى Inés Ruiz Pastor [2] دراسة تجريبية لتحديد سلوك الفشل لأنبوب ذو مقطع دائري مصنع من مادة مركبة متعددة الطبقات مدعمة بألياف الزجاج أحادية الاتجاه، تخضع لحمولة الشد وكانت نتائج الدراسة أن الفشل يحدث في العينة المدروسة بسبب ظهور شق التوائى ميكروي في الرقاقة الواحدية ذات السماكة الأقل وتحت استمرار تأثير الحمولة المطبقة يستمر الشق في النمو ليسبب فصل في الطبقات وحدث الكسر في الألياف.

أما فيما يخص تحليل فشل الصفيحة المركبة ذات n طبقة فهو يعد أكثر تعقيداً من تحليل الرقاقة الواحدية، إذ انه يتطلب تنبؤاً دقيقاً لقوة كل طبقة من خلال حساب الاجهادات على محورها الأساسي في كل طبقة وتطبيق معايير الفشل المناسبة. كما وتعتمد قوة الصفيحة على زاوية اتجاه الصفيحة، والقوة، والصلابة، ومعامل التمدد الحراري والرطوبة، وتسلسل التراص، وأخيراً عملية التصنيع التي تؤثر على الاجهادات المتبقية، والتي تؤثر بدورها على قوة الصفيحة. هذا لا يعني أن الصفيحة كلها قد تفشل مباشرة ولكنه بداية عملية الفشل.

كما قام كل من Ralph و Chungy [3] بدراسة تجريبية تمت باستعمال تصاميم وطرائق اختبارية خاصة لحساب مساهمة كسر الليف وتشوهه علاوة على تراكب (راتنج - ليف) في الطاقة الممتصة لمادة مركبة، ولقد تم فحص ثلاثة انواع من الألياف (spectra-900 PE, Kevlar-49, graphite) واطهرت النتائج ان (spectra-900 PE) يمتلك طاقة كسر اعلى يليه Kevlar-49 ثم graphite ومن خلال دراسة سلوك (الأجهاد- الانفعال) للألياف السابقة الذكر، فقد وجد بعد الفحص ان القيمة القصوى لطاقة الفشل لهذه الألياف تزداد مع زيادة معدل الانفعال نتيجة تولد موجة اجهاد شد عالية اثناء اجراء الاختبار، وقد بينت الدراسة ان تشوه الليف والكسر هما المساهمان الرئيسان لعملية امتصاص هذه الطاقة في البنية التركيبية للصفح المركب.

أما Ramesh Talreja [4] فكان بحثه حول نظريات فشل المواد المركبة، ومن خلال مراجعة الافتراضات الأساسية للنظريات في ضوء الفهم الحالي لآليات الفشل، وجد أن النظريات السابقة، مثل تساي هيل و تساي وو، لا تأخذ بعين الاعتبار الطبيعة الفيزيائية لآلية الفشل، على خلاف النظريات اللاحقة، مثل نظرية Hashin و Puck، فهي قادرة على تحديد أنماط الفشل إلا أنها لا تستطيع التنبؤ بسلوك الفشل للصفيحة المركبة في حين نظريات أخرى كنظرية الإجهاد الأقصى ونظرية الانفعال الأقصى تمتلك القدرة على التنبؤ بالفشل إلا أنه بشكل عام يتم تقييد تطبيق هذه النظريات من خلال صياغتها على افتراض أن المركبات التطبيقية هي مركبات متجانسة بهدف تطبيق حسابات نظرية الـ (Classical Lamination Theory) CLT وإيجاد قيم الفشل والقيم القريبة من الفشل.

كما وأبلغ Joshi and Sun [5] في دراسة لهما حول تلف المادة الحاضنة (Matrix damage) عن نمط نموذجي لتشقق وفصل الطبقات لعينة من مادة مركبة طبقية حيث يعتبر تلف المادة الحاضنة هو النوع الأول من الفشل الحاصل عند تعرض العينة لحمولات محددة، وعادة ما يأخذ الفشل شكل تكسير للمادة الحاضنة وإزالة الترابط بينها وبين الألياف إذ تبدأ الشقوق في مادة الربط (matrix) في الطبقات العليا والطبقة الوسطى كما وتتشكل شقوق ناتجة عن اجهاد القص العرضي عبر المادة.

درس أيضاً Dong وزميله [6] أنماط التشوه الحاصلة في المواد المركبة الصفائحية المدعمة بالألياف والتي تكون طبقاتها متوضعة بزوايا مختلفة عند خضوعها للشد حيث تم تحديد نمطين أساسيين للانتهيار النهائي، النمط الأول يتمثل بسحب للطبقات الداخلية نحو الخارج بسبب الشقوق المستعرضة (العرضية) والانزياحات الطباقية بدون حدوث انكسار بالألياف، وأما النمط الآخر فهو عبارة عن شق منفرد يمتد عبر عرض الصفيحة.

كما ودرس الباحثان Agarwal, B.D. and L.J. Broutman [7] عبر تجاربهما على صفيحة مركبة مقواه بألياف زجاجية منسوجة (GFRP) تأثير طبيعة الحمل الذي تتعرض اليه الصفيحة وتوصل الى ان التلف يحدث في اللوح المركب الرقائقي بشكل رئيسي بسبب فشل مادة التعزيز مما يؤدي لتشوه الصفيح تحت تأثير حمل الشد كما ولاحظ أيضاً ان جزء من فصل الطبقات وازاحتها يحدث أيضاً بسبب حمولة القص في المستوي.

قام Karthick وزملاؤه [8] بحساب عمر الشد للبوليمر المقوى بالألياف الزجاجية وذلك بإجراء تجارب استبدال باب سيارة فولاذي بباب اخر مصنع من المواد المركبة الطبقية وتوصلوا الى تحسين ملحوظ في قيم الخصائص الميكانيكية كعامل يونغ، ونسبة بواسون، كما قاموا بتحديد القوة القصوى وقوة الخضوع للمادة عن طريق إجراء اختبار الشد على العينة المصنعة وتم التحقق من صحة البيانات التجريبية عددياً باستخدام برنامج ANSYS كذلك قام Chowdhury وزملاؤه [9] بمجموعة من اختبارات الشد على عينات ذات تصميم مختلف من البلاستيك المقوى بألياف الكربون (CFRP) بهدف دراسة أنماط التشوه والانهييار الحاصلة في المادة، ووجدوا وبالمقارنة والتجريب أن تصميم العينات وطريقة الاختبار تؤثر على دقة الحصول على إجهادات المادة الرابطة.

في المجال ذاته قام Sadaq وزملاؤه [10] بإجراء اختبارات الشد على مواد مركبة صفائحية محضرة من الإيبوكسي المدعم بألياف الزجاج والتي تستخدم في أوعية الضغط والأنابيب وذلك لدراسة خواصها الميكانيكية والفيزيائية وإيجاد قيم قوتها ومقاومتها، وقاموا بإجراء نمذجة لتلك العينات المختبرة باستخدام نظرية العناصر المنتهية FEA واستنتجوا أن المواد المركبة ذات زاوية الألياف (60°) تمتلك قيماً أقل للتشوه (deformation) عن غيرها، بينما المواد ذات التوجهات الليفية بزوايا (90°) تمتلك الانفعال الأقل، ولذلك فإن كلتا الزاويتين تعتبران زوايا الالتواء (اللف) المثالية عند العمل بالمواد المركبة.

وبحسب Liang وزملاؤه [11] الذين قاموا بقياس خواص الشد للمادة المركبة المكونة من البولي بروبيلين (PP) المدعم بثلاث أنواع وأحجام من ألياف الغارفين (GNPs) وذلك باستخدام جهاز اختبار عالمي وفي درجة حرارة الغرفة وسرعة تمدد (50 mm/min)، فقد وجدوا أن قيم معامل يونغ للمادة المركبة تزداد كما تزداد قيم مقاومة الإجهاد وقيم الكسر على الشد بشكل طفيف بينما تتناقص قيم استطالة الشد عند الكسر مع زيادة وزن الجزء من ألياف (GNPs).

بشكل عام تبدي المواد المركبة سلوكاً مختلفاً (للإجهاد-انفعال) عند تعرضها للشد والضغط، لذلك قام Moreno وزملاؤه [12] بدراسة تأثير هذا الاختلاف في شروط اختبار الانحناء بثلاث نقاط على مواد صفائحية مكونة من الإيبوكسي المقوى بألياف الكربون المستمرة أحادية الاتجاه. وضمن شروط (العرض-السماعة) جرى تحديد نمط الانهييار الحاصل فيما إذا كان قص shear أو انعطاف flexural. حيث أنه للعينات بعرض (25 mm) وسماعة (1.25mm) حصل انهيار بالقص، بينما حصل انهيار بالانعطاف في العينات ذات السماعة (2 mm).

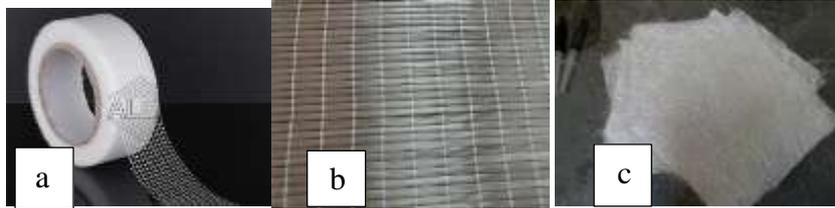
درس Feng وزملاؤه [13] سلوك التعب الناتج عن الشد للمادة المركبة الصفائحية (Carbon/Epoxy) حيث حددت أنماط الانهييار الرئيسية الحاصلة في العينات المعرضة للشد الستاتيكي، بكسر قصفة في منطقة صغيرة، كذلك قاموا بدراسة تأثير زوايا واتجاه الألياف حيث استنتجوا أن توضع الطبقات بزوايا 90° تبدي مقاومة أقل للتشوه خلال الاختبار.

طرائق البحث ومواده:

❖ المواد المستخدمة في البحث هي:

- المادة الرابطة البوليميرية: تم استخدام راتنج البولي استر غير المشبع UPR كمادة رابطة بوليميرية.
- المادة البادئة: تم استخدام مادة بيروكسيد الميثيل إيثيل كيتون (MEKP) كمادة بادئة لحدوث التفاعلات في المزيج المستخدم.
- المادة المسرعة: تم استخدام محلول الكوبالت نفتات الحاوي على نسبة 6% كوبالت، كوسيط معالج مسرع لعملية بلمرة البولي استر.

- الألياف الزجاجية: تم استخدام ثلاث أنواع مختلفة من الألياف الزجاجية لتدعيم راتنج البولي استر وهي: (العشوائية (Mat)، الشبكية (Mesh)، الألياف الموجهة أحادية الاتجاه (Unidirectional Fiberglass))، ويوضح الشكل (1) أنواع الألياف الزجاجية المستخدمة.



الشكل (1) أنواع الألياف الزجاجية المستخدمة في العينات (a عشوائي (b موجة (c الشبكية).

❖ تحضير عينات الاختبار:

تم تحضير عينات البولي استر الصفائحية (الطبقيّة) المقواة بالألياف الزجاج، في مخبر البلاستيك في وسط غير معزول حرارياً (غير أدبياتي)، بطريقة الدهان اليدوي Hand Lay-up بدرجة حرارة الوسط المحيط ($20-25^{\circ}\text{C}$) حيث وضعت كميات مختلفة من البولي استر غير المشبع UPR وأضيفت كل من المادة البادئة البيروكسيدية (MEKP) بنسبة (1%) والمادة المسرّعة (Cobalt Naphthanate) بنسبة (0.5%) من مادة UPR ثم جرى مزج الخليط يدوياً لمدة لا تتجاوز دقيقة واحدة، من ثم تم قص طبقات الألياف الزجاجية بأبعاد (20×20cm) ومن ثلاث أنواع مختلفة هي (العشوائية (Mat)، الشبكية (Mesh)، الألياف الموجهة أحادية الاتجاه (Unidirectional Fiberglass)).

تم مد طبقة من UPR بواسطة فرشاة دهان يدوية على قالب مكون من صفيحة ألومنيوم أبعادها (20×20 cm) ومن ثم وضعت طبقة من نسيج الألياف الزجاجية حسب النوع المستخدم، ومن ثم طبقة من البولي استر بحيث يتم تشبييع الألياف الزجاجية حتى يتغلغل الراتنج بشكل جيد ضمنها، يليها طبقة أخرى من النسيج الليفي وهكذا حتى نحصل على عدد الطبقات المطلوب، ومن ثم توضع صفيحة ألومنيوم أخرى بعد إكمال عدد الطبقات، بعد ذلك عرضت العينة لضغط لمدة 24 ساعة على الأقل في درجة حرارة الغرفة.

تم تحضير ثلاث سلاسل من العينات وفقاً لنوع الألياف الزجاجية وهي: الألياف العشوائية، الألياف الشبكية، الألياف أحادية الاتجاه الموجهة وتحوي كل سلسلة على أربع عينات كما يلي: 3، 8، 14، 17 طبقة من الألياف الزجاجية.

القسم التجريبي:

اختبار الشد Tensile test :

أجري اختبار الشد للعينات المصنعة على جهاز من نوع Iber Test IBMU4 1000/MD2W في مخبر مقاومة المواد بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية حيث اعتمدت سرعة تحميل [1 KN/Sec].

النتائج والمناقشة:

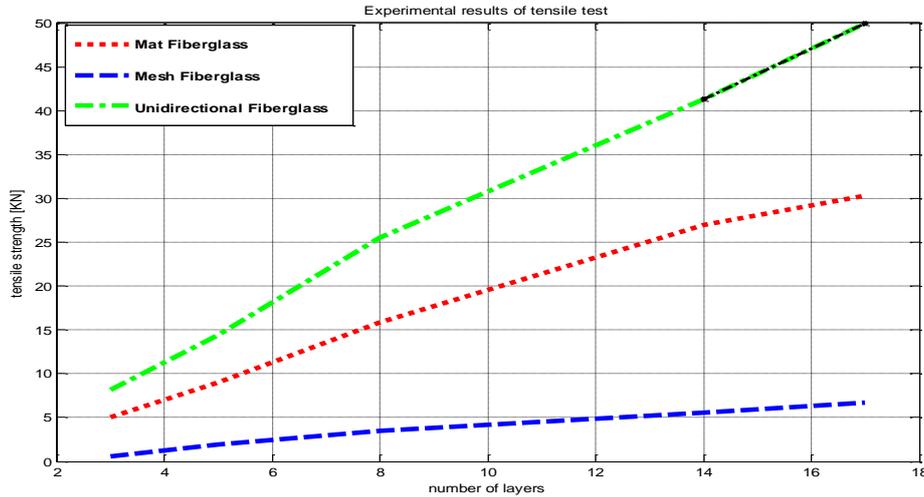
تُعبّر نتائج اختبار الشد عادة عن متانة المادة وتعتبر معياراً في العديد من الاختبارات كونها تقدم فكرة واضحة عن متانة المادة وقدرتها على تحمل الإجهادات الخارجية المؤثرة مهما اختلفت طبيعتها. حيث أظهرت نتائج اختبار الشد التي أجريت على العينات تحسّن قيم إجهادات التحطم على الشد بزيادة عدد طبقات التسليح، وهذه النتيجة تطابقت في كل أنواع ألياف الزجاج المستخدمة. [13]. [17].

حيث تتعرض الصفائح الطباقية المحضرة من المواد المركبة (مادة أساس بوليميرية، ألياف تسليح) إلى أنواع مختلفة من الإجهادات عند تعرضها لحمولات الشد، ونتيجة لذلك تتعرض العينة المختبرة إلى أضرار متنوعة وخاصة عند حدوث الفشل. حيث تشير الدراسات التي أجريت سابقاً على العينات المحضرة من البولي استر غير المشبع إلى تعرضه للثقوب عند استخدامه كمادة رابطة للألياف، وتعرض ألياف التسليح الزجاجية إلى التقطع والتمزق، ونتيجة لتشكيل إجهادات قاصة يحدث فصل بين الطبقات بالإضافة إلى أضرار أخرى متنوعة يمكن ملاحظتها بالعين المجردة. وتسبب إجهادات القص المتولدة حدوث الأضرار السابقة نتيجة التأثير بقوة عالية التركيز على صفائح لوح الاختبار، حيث تسبب هذه القوة نشوء أنواع مختلفة من القوى، فهي من جهة تساهم بنشوء قوة ضاغطة تعمل على فصل هذه الطبقات بعضها عن بعض ومن جهة أخرى ونتيجة رد فعل ألياف التسليح تنشأ قوى شد تسبب حدوث انقطاعها.

❖ دراسة تأثير نوع الألياف على قيم حمولات الفشل وشكل الضرر الحاصل في عينات الاختبار:

- بالنسبة لقيم حمولات الفشل للعينات المختبرة:

تتغير قيم حمولات الفشل بتغير نوع الليف الزجاجي المستخدم وعدد طبقات الصفيح المركب والمنحنيات البيانية التجريبية التالية توضح قيم الحمولات القريبة من الفشل وتلك التي تسبب الفشل بعد اختبارها على الشد:



الشكل (2) منحنيات الشد التجريبية للسلاسل الثلاثة للعينات المختبرة على الشد.

يوضح الشكل (2) أن العينات ذات الألياف الزجاجية أحادية الاتجاه أبدت قيم عالية لتحمل حمولات الشد قبل أن تفشل تليها الألياف الزجاجية عشوائية التوجه واخيراً الألياف الزجاجية الشبكية التي أبدت قابلية ضعيفة جداً لتحمل إجهادات الشد فقد فشلت هذه الأنواع من الألياف بسرعة وعند حمولات شديده منخفضة.

ومن أجل التأكد من مدى مطابقة النتائج التجريبية برمجياً تم وضع خوارزمية توضح آلية التعامل مع الدراستين الرياضية والحاسوبية كما في الشكل (3)، وبعد تطبيق قوانين المعادلات (من 1 حتى 5) والحصول على القيم اللازمة لتطبيق الخوارزمية الواضحة في الشكل. وكتابة الأكواد المناسبة باستخدام Matlab وتطبيق قوانين قاعدة الخلط (rules of Mixtures) رياضياً [6]. [21] لأجل مساحة مقطع الجزء العامل (A) من العينات المدروسة كما توضحه المعادلات التالية، وبمعرفة الخصائص الميكانيكية لليف المدروس، تُحسب قيمة الحمولة التي يحدث عندها كسر وفشل في العينة المدروسة (p_{fail}) تبعاً لمساحة مقطع الجزء العامل (A) وقيمة الاجهاد للمادة المركبة المختبرة ككل (σ_c) وفق العلاقات التالية:

$$p_{fail} = \sigma_c * A \dots (1)$$

$$\sigma_c = \sigma_m * V_m + \sigma_f * V_f \dots (2)$$

(الحجم الجزئي الذي تشغله المادة الحاضنة) $\frac{\rho_c}{\rho_m} * M_m = V_m$

(الحجم الجزئي الذي تشغله الالياف) $\frac{\rho_c}{\rho_f} * M_f = V_f$

حيث: ρ_c كثافة المادة المركبة [Kg/m³].

ρ_m كثافة المادة الحاضنة [Kg/m³].

ρ_f كثافة الالياف [Kg/m³].

M_f و M_m : الجزء من كتلة المادة الحاضنة والالياف على الترتيب [يعطى كنسبة مئوية %].

A : مساحة مقط الجزء العامل من العينة المدروسة [cm²].

ويمكن حساب قيمة الانفعال الأقصى ϵ_u لكل من المادة الحاضنة والالياف من أجل نقطة الكسر -الفتل- (الاكثر انفعالاً) كما يلي: [6]

$$\epsilon_u = \frac{\sigma_u}{E} \dots (3)$$

حيث: σ_u قيمة الاجهاد الأقصى [Mpa] ، E قيمة معامل يونغ [GPa] وتُعطى القيمتان تبعاً لنوع الليف المستخدم. ومنه تُحسب قيم الاجهادات لكل من المادة الحاضنة σ_m والالياف [Mpa] σ_f وفق العلاقات التالية: [9]. [6]

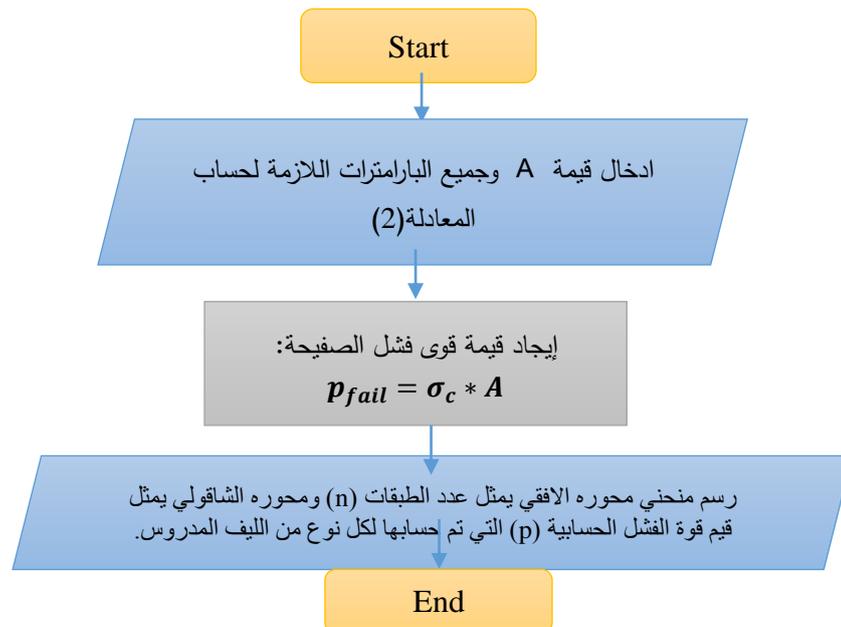
$$\sigma_m = E_m * \epsilon_{mu} \dots (4)$$

$$\sigma_f = E_f * \epsilon_{fu} \dots (5)$$

حيث: ϵ_{mu} الانفعال الأقصى للمادة الحاضنة [كنسبة مئوية %].

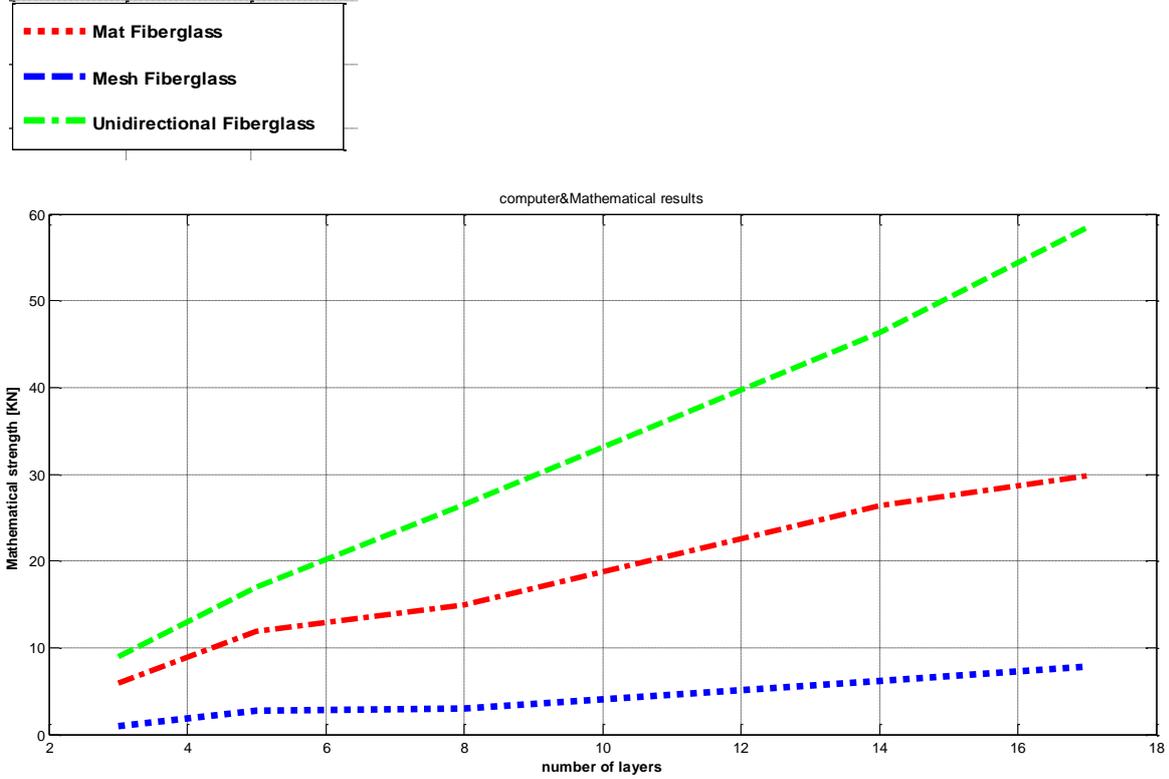
ϵ_{fu} الانفعال الأقصى للليف [كنسبة مئوية %] ..

E_m, E_f : معامل يونغ لكل من الالياف والمادة الحاضنة على التوالي [GPa].



الشكل (3) خوارزمية آلية التعامل مع الدراستين الرياضية والحاسوبية.

مع الأخذ بعين الاعتبار لاختلاف السماكات (t) باختلاف عدد الطبقات (n) لكل عينة من كل سلسلة من السلاسل الثلاثة التي تم تحضيرها وتجريبها وتبعاً للخصائص الميكانيكية لكل نوع من الليف المدروس وتطبيق الخوارزمية الموضحة أعلاه حاسوبياً تم الحصول على منحنيات قوة الشد حتى الفشل للعينات المدروسة كتابع لعدد طبقات العينة، كما في الشكل (4):



الشكل (4) منحنيات الشد للسلاسل الثلاثة للعينات المختبرة على الشد بمرجياً.

وبالمقارنة ما بين المنحنيات التجريبية والنظرية كما يوضح الجدول (1) فإن النتائج متقاربة بخطأ مقبول، كما وتظهر المخططات المبينة بالأشكال أعلاه بمختلف أنواعها العلاقة الخطية بين قوة الشد وعدد الطبقات حتى قيم محددة لتستمر الصفة الخطية حتى حدوث تحطم العينة، حيث يتم حدوث التحطم الابتدائي الأولي في مادة الأساس البوليميرية الرابطة (matrix) قبل بدء تأثير الإجهاد المطبق على الألياف التي تستمر في مقاومتها لإجهاد الشد المطبق حتى حدوث الانهيار في عينة الاختبار.

أيضاً أظهرت النتائج تأثير عدد طبقات التسليح على قيم الفشل ومقاومة إجهادات الشد فكلما ازداد عدد الطبقات تزداد معه قيم قوى الشد.

- بالنسبة لشكل بروفيل الضرر الحاصل في العينات المختبرة:

أظهرت نتائج الاختبارات تشابهاً في سلوك التحطم للعينات حيث يُلاحظ أن كافة العينات تسلك سلوك المواد القصفة الهشة عند التحطم. كما ويُلاحظ القيم المنخفضة للانفعالات عند التحطم لكافة العينات وذلك بسبب الطبيعة المتباينة لخواص الليف ومادة الأساس حيث ان الليف يتحمل قيم عالية من الاجهاد عند قيم منخفضة للانفعال في حين المادة الأساس (matrix) خلاف ذلك.

الجدول (1) يوضح التغير في قيم حمولات الفشل على الشد (تجريبياً وبرمجياً) تبعاً لنوع الليف المستخدم.

قوة الفشل [KN]		نوع الليف	العينة
رياضياً	تجريبياً		
5.92	5	عشوائي	3 طبقات
11.85	9		5 طبقات
14.93	15.85		8 طبقات
26.403	27		14 طبقات
29.830	30.303		17 طبقات
0.930	0.552	mesh	3 طبقات
2.670	1.967		5 طبقات
2.967	3.484		8 طبقات
6.205	5.602		14 طبقات
7.8	6.707		17 طبقات
9	8.199	موجهة	3 طبقات
17	14.40		5 طبقات
26.55	25.56		8 طبقات
46.305	41.369		14 طبقات
58.401	49.95		17 طبقات

من المفيد ذكره هنا أنه عند اختبار الشد ظهرت سلوكيات متشابهة لمناطق الانهيار على الرغم من اختلاف عدد طبقات التسليح المستخدمة من أجل النوع ذاته من الألياف المستخدمة، في حين اختلفت سلوكيات الفشل لمناطق الانهيار باختلاف نوع الليف المستخدم فقد أظهرت التجربة تطورات مختلفة بأنماط التحطم تبدأ بانقطاع العينة وحدوث انسلاخات جزئية للألياف في منطقة التحطم.

ومن خلال دراسة ميكانيزمات التشوه الحاصل نتيجة قوى الشد لوحظ عدم وجود تباين واضح بشكل وطبيعة الضرر الحاصل في العينات أثناء الاختبار، وتظهر الأشكال التالية ادناه وجود تدرج في انسلاخ للألياف من مادة الأساس، وانفصال بالطبقات عند زيادة عددها، والوصول إلى حالة تحطم مصحوبة بانسلاخ، انفصال بالطبقات، تحطم مادة الأساس البوليميرية - تبعاً لنوع الليف المستخدم - كما توضحها الأشكال (5 حتى 9) المبينة الآتية:

a- السلسلة الأولى (الألياف الزجاجية العشوائية):

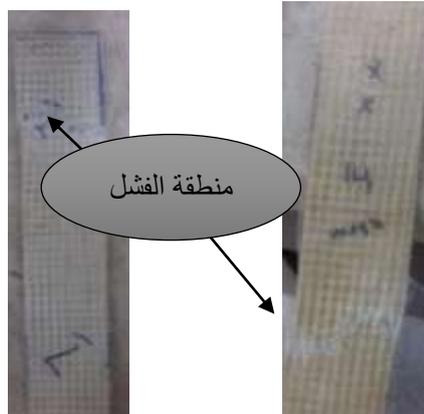


الشكل (5) انسلخات واضحة على طول الجزء العامل مترافق مع فصل بين الطبقات لعينة الـ 3، 5 طبقات (عشوائية).

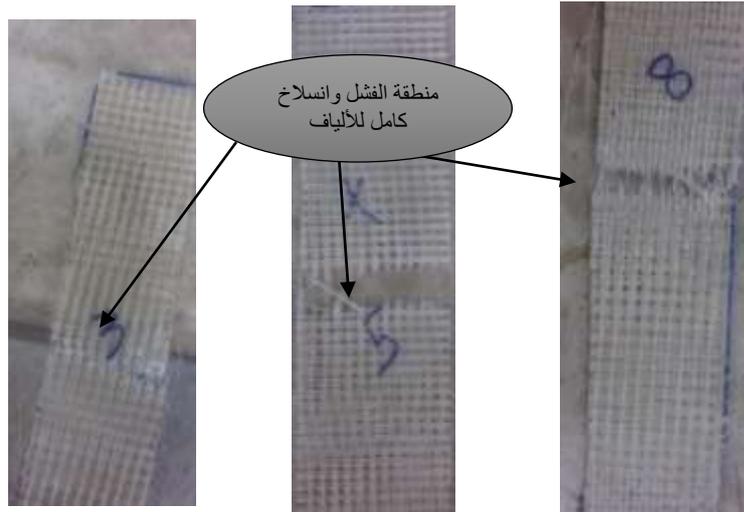


الشكل (6) تحطم للعينة مترافق مع تشوه عام وانسلخات في ألياف التسليح لعينة 17,14,8 طبقة (عشوائية).

b- السلسلة الثانية (الألياف الزجاجية الشبكية):



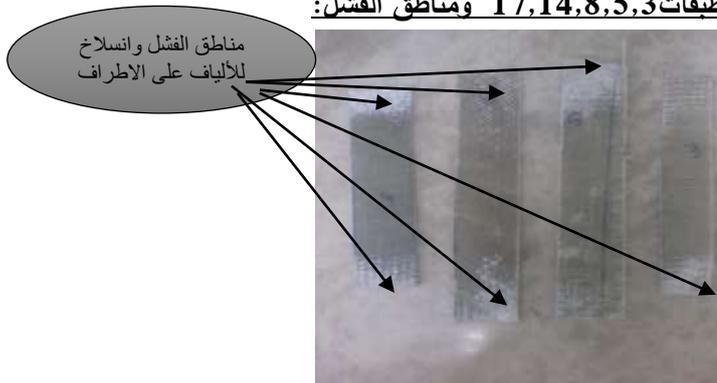
الشكل (7) يوضح العينتان ذات 14 و 17 طبقة بعد الفشل باختبار الشد.



الشكل (8) يوضح العينة ذات 3,5,8 طبقات بعد الفشل باختبار الشد .

c- السلسلة الثالثة (الألياف الزجاجية الموجهة):

صور العينات للألياف الموجهة ذات الطبقات 3,5,8,14,17 ومناطق الفشل:



الشكل (9) منظر عام لشكل الفشل الحاصل في العينات المسلحة بالألياف الزجاجية الموجهة باختبار الشد.

ويمكن من خلال أنماط الفشل الحاصلة في عينات الاختبار جراء الشد والمبينة بالأشكال السابقة تقديم التحليل التالي:

(1) في حالة التسليح بألياف زجاجية عشوائية نلاحظ ما يلي:

- تحطم مادة الأساس وتفتتها بشكل جزئي بجوار منطقة التحطم.
- انقطاع تام في ألياف التسليح بمنطقة التحطم.

- انسلاخ جزئي لبعض ألياف التسليح وتظهر نتائج الاختبارات تساوي أطوال الألياف المنسلخة تقريباً.
- يأخذ الفشل شكل تكسير للمادة الحاضنة وإزالة الترابط بينها وبين الألياف ليحدث بعدها فشل للعينة.

(2) في حالة التسليح بألياف زجاجية شبكية نلاحظ ما يلي:

- انقطاع تام في ألياف التسليح بمنطقة التحطم عند وقت اقل مما ابدته عينات الألياف العشوائية والموجهة.
- حدوث انفصال في الألياف التسليح وفشل العينة ككل وبشكل مباشر عند تعرضها لاختبار الشد.
- لم يُلاحظ أي انفصال في طبقات عينات الاختبار على الألياف الشبكية وإبقاء الشد محورياً صرفاً غير مترافق مع اجهادات قص.

- 3) في حالة التسليح بألياف زجاجية أحادية الاتجاه نلاحظ ما يلي:
- لوحظ خلال التجارب على العينات المخصصة لاختبار الشد للألياف الزجاجية الموجهة المحصورة بأن مناطق حدوث الفشل للعينات كانت على طرفي العينات مع حدوث انسلخات متباينة لألياف التسليح وبأطوال مختلفة نتيجة التأثير غير المتجانس لقوى الشد على كامل مقطع العينة.
 - ان الاليف الزجاجية الموجهة (ذات التوجه $0^\circ/90^\circ$) هي ذات المقاومة الأعلى للتشوه خلال اختبارها على الشد.

الاستنتاجات والتوصيات:

- من أجل صفائح طبقية مركبة مصنعة من ألياف زجاجية مستمرة متجانسة الخواص يمكن التوصل لما يلي:
1. تزداد قيمة قوى الشد عند الانقطاع (التحطم) بزيادة عدد الطبقات وتسجل أكبر قيمة عند استعمال الألياف الزجاجية الموجهة.
 2. بزيادة عدد طبقات الصفيح المدروس تتعدد عملية تحليل سلوك الفشل تحت تأثير حالات التحميل للحمولات المطبقة بسبب التوزيع غير المنظم للإجهادات في الصفيح المركب.
 3. تقارب نتائج الاختبارات التجريبية مع النظرية يعطي إمكانية للتنبؤ بقيم حمولات الفشل وقيم الاجهادات عند كل طبقة.
 4. تباين قليل في أنماط التشوه الحاصلة للمواد المركبة الطباقية المدعمة بألياف زجاجية رغم اختلاف نوع وتوضع الألياف.
 5. توضع الصفائح الطباقية فوق بعضها بتوجهات زاوية موحدة لليف ($90^\circ / 90^\circ$) يجعلها أقل انفعالاً من غيرها، وبالتالي أقل مقاومة للتشوه عند اختبارها على الشد.
 6. تزداد قيم حمولات الشد المطبقة على العينات المسلحة بألياف زجاجية (ذات التوجه $0^\circ/90^\circ$) مما يجعلها ذات مقاومة أعلى للتشوه عند اختبارها على الشد.

References:

- [1] Rachel Koh, Madsen., "Strength failure criteria analysis for a flax fiber reinforced composite".,(2018).
- [2] Liang, Ji-Zhao, et al. "Tensile properties of graphene Nano-platelets reinforced polypropylene composites." *Composites Part B: Engineering* 95 (2016): 166-171.
- [3]Tsai, Stephen W., and H. Thomas Hahn. "Introduction to composite materials". Routledge, (2018).
- [4] Ralph, Chungy., "Interfiber/interlaminar failure of composites under multi-axial states of stress", *Composites Science and Technology*,(2009).
- [5] Ramesh Talreja, "Assessment of the fundamentals of failure theories for composite materials", (2014).
- [6]QIAO Yangyang, BAI Yuanli., "A Review on Failure Modeling Methods of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites".,(2018).
- [7] Mortell, D.J., Tanner, D.A., McCarthy, C.T. "An experimental investigation into multi-scale progression in laminated composites in bending". *Composite Structures*(149),(2016): 33-40.
- [8] Agarwal B, Broutman LJ, Chandrashekhara K: "Analysis and performance of fiber composites".,4th ed., Hoboken NJ, Wiley ,(2018),.

- [9] A.Karthick, 2Karthik Prabu B, 3Johnson V, 4Karthik Praveen, 5Kiran P. **"EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP) COMPOSITE LAMINATES"**,(2017).
- [10] Chowdhury N., Wang J., Chiu W., Yan W.,**"Matrix failure in composite laminates under tensile loading. Composite Structures"**, (2016):135, 61-73.
- [11] liT Research InstituteChicago.,**" FAILURE MECHANISMS IN FIBER REINFORCED COMPOSITES"** I. H. Daniel Illinois.,(2016)
- [12] Liang J., Du Q., Tsui G., Tang C. **"Tensile properties of graphene Nano-platelets reinforced polypropylene composites"**. Composites Part B, 95, 166-171.,(2016).
- [13] ASTM International., **"Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics"**.,(2010).
- [14] Clyne TW, Hull D: **"An introduction to composite materials"**, 3rd Ed.,Cambridge , Cambridge University Press. (2019),
- [15] Hamed, A. F., Hamdan, M. M., Sahari, B. B., & Sapuan, S. M. **"Experimental characterization of filament wound glass/epoxy and carbon/epoxy composite materials"**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, (2018):3(4), 76-87.
- [16] Dong, H., & Wang, JA.,**"criterion for failure mode prediction of angle-ply composite laminates under in-plane tension"**. Composite Structures, . (2015). 128, 234-240.
- [17] Kalidass, R., & Balaji, S. **"Tensile Test for Environmental Effect On Glass Fiber Composite Materials"**. The International Journal of Engineering and Science, (2014).,3, 23-27.
- [18] Talreja, R.,**"Assessment of the fundamentals of failure theories for composite materials"**. *Composites Science and Technology*, . (2014). 105, 190-201.
- [19] Rachel Koh.,**"Strength failure criteria analysis for a flax fibre reinforced composite"**. ,(2018).,
- [20] QIAO Yangyang, BAI Yuanli., **"A Review on Failure Modeling Methods of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites"**.,(2018).
- [21] Qiao Y, Bisagni C, Bai Y.,**"Experimental investigation and numerical simulation of unidirectional carbon fiber composite under multi-axial loadings"**.,(2017)
- [22] Kotik, HG and JEP Ipina.,**"Short-beam shear fatigue behavior of fiber metal laminate"**.,(Glare)International Journal of Fatigue.,(2017).