

دراسة مقاومة الصفائح المستخدمة في عمليات التصفيح والمحضرة من المواد المركبة للصدم عالي السرعة

د. نزار عبد الرحمن*

د. لطيفة الحموي**

نورا سليمان***

تاريخ الإيداع 25 / 10 / 2016. قُبل للنشر في 19 / 3 / 2017

□ ملخص □

في هذا البحث تم دراسة مقاومة ألواح صفائحية متعددة الطبقات (بنى مركبة) مصنوعة من البولي استر غير المشبع المسلح بالألياف الزجاجية للصدم عالي السرعة، وبإضافة بعض المواد المألثة بهدف استخدامها كطبقات حماية لأغراض التصفيح. ولتحقيق هذا الهدف تم تحضير مجموعة من العينات من مادة البولي استر غير المشبع كمادة أساس بوليميرية والألياف الزجاجية كمادة تدعيم حيث استخدمت ثلاث أنواع من الألياف هي (العشوائية، المنسوجة، الموجهة).

أخضعت العينات لاختبار الصدم عالي السرعة (قذافي) بهدف استقراء قدرة العينات على امتصاص طاقة الصدم ودراسة أنماط التشوه والانهيال الحاصلة. بينت النتائج أن لهذه العينات قدرة على امتصاص جزء من طاقة القذيفة، كما وسجلت أنماطاً معقدة ومختلفة للضرر والتشوه من حيث شكل بروفایل الضرر واتضح أنها تختلف باختلاف نوع الألياف الزجاجية المستخدمة، حيث أظهرت الألياف الموجهة أكبر مساحات للضرر والتشوه وبالتالي أعلى قدرة على امتصاص طاقة الأحمال. بينت النتائج أيضاً أن إضافة المواد المألثة (رمل، براددة حديد) أثر سلباً على النتائج حيث قلل من قدرة العينة على امتصاص طاقة الصدم.

الكلمات المفتاحية: البولي استر غير المشبع ، ألياف زجاجية ، اختبار الصدم عالي السرعة

* أستاذ مساعد - قسم الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية
** أستاذ مساعد - قسم التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية
*** طالبة دراسات عليا - قسم التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

Studying the Resistance of Laminated Composite Panels used in the Lamination against High-velocity Impact

Dr. Nizar Abdulrahman^{*}
Dr. Latifa Al Hamwi^{**}
Noura Suleiman^{***}

(Received 25 / 10 / 2016. Accepted 19 / 3 / 2017)

□ ABSTRACT □

In this research, the resistance against high-velocity impact was studied of the laminated composite panels prepared from unsaturated polyester and armed with glass fibers in addition to some fillers in order to improve their properties. To achieve this goal, a set of samples was prepared from unsaturated polyester as a matrix and fiber glass used as a reinforcement material where three types of fibers are used (Mat, Woven, and Unidirectional). The samples were subjected to high-velocity impact test (ballistic) in order to extrapolate the sample's ability to absorb the kinetic energy of the projectile and to study the deformation and failure patterns occurred. As for the testing results, the samples have shown a very good ability to absorb a large part of the projectile energy and recorded complex and different modes in terms of damage and deformation in the form of profile damage. Moreover, it was found that the absorption and energy dissipation increase with the number of layers, and the unidirectional fibers showed the best results. Experiments also exposed that the addition of fillers (sand, iron filings) presented negative results and reduced the sample's ability to absorb impact energy.

Key Words: Unsaturated Polyester Resin, fiber glass, Ballistic impact test

* Assistant Professor: Mechatronics Department - Mechanical and Electrical faculty - Tishreen University - Latakia – Syria.

** Assistant Professor: Design and Production Department - Mechanical and Electrical Faculty - Tishreen University - Latakia - Syria.

*** Postgraduate Student, Design and Production Department - Mechanical and Electrical Faculty - Tishreen University - Latakia – Syria.

مقدمة:

بغرض مواكبة التطور الحاصل في الصناعات التكنولوجية المتقدمة وتحديدًا فيما يخص مجال الهندسة الميكانيكية والحاجة المتزايدة لظهور مواد جديدة ذات كفاءة عالية في التطبيقات التي تعمل في أوساط قاسية كبدايل عن السبائك ذات الأساس المعدني، تم الاتجاه إلى المواد المركبة وخاصة الطبقة لتمتعها بخواص ميكانيكية عالية دفعت بها إلى أعلى القائمة وجعلتها العنصر المفضل المستخدم في معظم التطبيقات الهندسية.

أهمية البحث وأهدافه:

❖ أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في إمكانية الحصول تجريبياً على بنى صفائحية مركبة مؤلفة من عدة طبقات تحقق، مقارنة بالمواد المعدنية التقليدية، خواصاً ميكانيكية مميزة بالإضافة إلى خفة الوزن والتكلفة المنخفضة نسبياً. تتمثل هذه الأهمية في إمكانية استخدام هذه البنى في التطبيقات العسكرية والبحرية والفضائية وكذلك الإنشائية كطبقات حماية ضد الصدمات والأحمال المختلفة التي يمكن أن تتعرض لها البنية.

❖ هدف البحث:

دراسة مقاومة ألواح صفائحية متعددة الطبقات (بنى مركبة) للصدم والاختراق، بهدف استخدامها كطبقات حماية لأغراض التصفيح، وذلك باستخدام راتنجات مناسبة مثل البولي استر غير المشبع ومواد تسليح مثل الألياف الزجاجية إضافة إلى مكونات خاصة يتم إضافتها إلى المادة الرابطة كالمالئات المعدنية واللامعدنية.

الدراسة المرجعية:

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

قام Shiriao وزميله [1] بدراسة حول سلوك الصدم القذافي للمواد المركبة المدعمة بألياف ثنائية الاتجاه، ثم مقارنة سلوك الصدم بين المواد المركبة المؤلفة من الايبوكسي وألياف الزجاج، والمواد المركبة المؤلفة من الايبوكسي وألياف الكربون، وتم تحديد عدة ميكانيزمات للضرر وامتصاص الطاقة وهي: تشكل مخروط (بروز مخروطي) على الوجه الخلفي للهدف، انهيار على الشد للخيوط الأولية، تشوه في الخيوط الثانوية، انزياح في الطبقات (فصل طبقي)، تشقق المادة الرابطة، انسداد بالقص، واحتكاك خلال الاختراق. كما وضعت صيغة تحليلية لكل ميكانيزم من ميكانيزمات امتصاص الطاقة وتم تحديد كل من الطاقة الممتصة خلال كل فترة زمنية، والتناقص في سرعة القذيفة. كما أوضح Gower وزملاؤه [2] أن ألواح المواد المركبة الصفائحية المستخدمة للحماية من الصدمات تشكل جزءاً هاماً من أجسام الدروع الواقية ويمكن أن تتعرض إلى أنواع مختلفة من الصدمات وذلك حسب نوع القذيفة، سرعة الصدم، وتركيب الدرع. لذا تم اختبار استجابة ألواح المواد المركبة للصدمات باستخدام قذيفتين الأولى من الفولاذ المقسى 120 بقطر (7.5mm) ذات رأس مخروطي، والثانية بقطر (9mm) ذات رأس نصف كروي. ولهذه الغاية استخدموا ألواح من الـ 129 , Kevlar 29 والتي عادة ما تستخدم في أجسام الدروع الواقية. تم إجراء عملية صدم لهذه الألواح بسرعات تتراوح بين (130 ÷ 250 m/sec) حيث أن هذه السرعات أقل من حد الاختراق للألواح. تبين بالنتائج أن المنحني البياني (للإجهاد - انفعال) تعرض لانحدارين بارزين، الأول يقابل استقامة الخيوط والثاني يقابل تمددها.

وبحث Reddy وزملاؤه في المقالة [3] سلوك الصدم القذافي للمادة المركبة الفينولية المقواة بألياف الزجاج (E-glass/phenolic) عند صدمها بقذيفة ذات قلب فولاذي طري، وذلك بدلالة سماكة الصفيحة وسرعة الصدم للقذيفة، وقد أظهرت النتائج أنه يوجد علاقة غير خطية بين الطاقة الممتصة وسماكة الصفيحة، حيث تم شرح تأثير كل من السماكة والسرعة على امتصاص الطاقة مع الأخذ بعين الاعتبار وقت التفاعل بين الهدف والقذيفة. كما تم وصف التغير في ميكانيزمات التشوه والانهييار وسماكة الهدف، حيث أن التشوه في الصفائح الرقيقة يكون على هيئة مخروط والفتحة تكون باتجاه الوجه الخلفي، أما عند سماكات أعلى فإن المخروط يملك فتحتين الأولى باتجاه الوجه الخلفي والثانية باتجاه الوجه الأمامي (وجه الصدم) وبذلك يكون على شكل ساعة رملية (hour glass). حيث يفسر مخروط التشوه على وجه الصدم لهدف تخين كنتيجة لانضغاط المادة لتشكيل دفع للصفيحة للأعلى لمقاومة طاقة الصدم، وقد وجدوا كذلك أن سماكة الهدف الكبيرة تساهم في زيادة امتصاص الطاقة وبذلك تزيد من السلوك القذافي، وتعزى زيادة مساحة منطقة الضرر في الصفائح السميكة إلى زيادة وقت الاحتكاك بين القذيفة والصفيحة.

كذلك درس Bienias وزملاؤه [4] سلوك الصدم وتوصيف الضرر الذي يحدث في صفائح المواد المركبة المدعمة بألياف الكربون و صفائح الألمنيوم بالمقارنة مع المواد البوليميرية الكلاسيكية الخالية من الألمنيوم وذلك عند صدمها بطاقة وسرعة منخفضة. حيث تم مناقشة كل من صفات الضرر الحاصل مع بداية وتقدم التشوه، أشكال وأساليب الانهييار الداخلي، وكذلك دور طبقات المعدن في سلوك الصدم تحت طاقة منخفضة، حيث تبين أن ميكانيزم التشوه للعينات المختبرة معقد جداً حيث يوجد تراجع (انحلال) بالمادة مع تشوه لدن في حالة الصفائح المدعمة بالألياف والمعدن، كما وجدوا أن أول نمط للتشوه هو شقوق المادة الرابطة (تشققات ناتجة عن القص والانحناء) تحدث عند السطوح البينية الفاصلة بين الألياف والمادة الرابطة ، وأيضاً فإن نمط التشوه الحرج يتمثل بالانزياح بين طبقات المادة المركبة باتجاهات مختلفة وأيضاً الانزياح في السطح البيني بين المادة المركبة والمعدن في الصفائح المدعمة بالألياف والمعدن. وقد أشارت المقاومة العالية للصدم في الصفائح المدعمة بالألياف والمعدن إلى أن طبقات المعدن (الألمنيوم) تمنع تقدّم (ازدياد) الفصل الطبقي والتعب الناتج عن القذيفة.

وقام Balaganesan وزملاؤه [5] بدراسة سلوك صفائح المواد المركبة المحضرة من الإيبوكسي وألياف الزجاج المضاف لها نسب مختلفة من الطين (clay) الممزوج مع الإيبوكسي، وذلك عند إخضاعها لصدم بقذيفة ذات قطر (9.5mm)، وحصلوا على النتائج التالية (وذلك من أجل عينات مع/وبدون إضافة الطين clay):

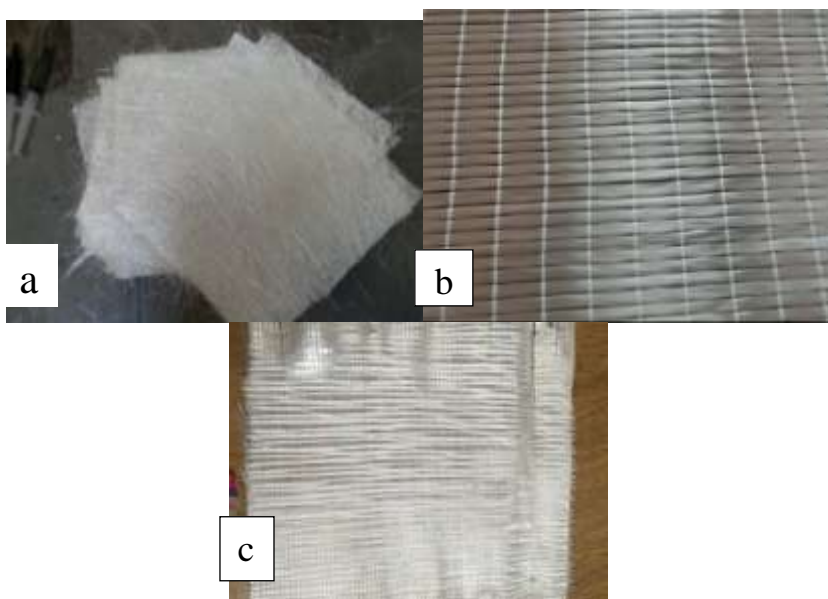
- تم امتصاص طاقة القذيفة من خلال أنماط انهيار مختلفة للصفائح تتضمن تشوه الألياف الثانوية، الفصل الطبقي، تشقق المادة الرابطة، والانهيار بالشد للألياف الأولية.
- كانت الطاقة الممتصة بالانحناء حوالي 70% من أجل كل العينات.
- لوحظ زيادة في امتصاص الطاقة من أجل العينات المضاف لها الطين clay حتى نسبة 50%.

طرائق البحث ومواده:

❖ المواد المستخدمة في البحث:

- المادة الرابطة البوليميرية: تم استخدام راتنج البولي استر غير المشبع UPR كمادة رابطة بوليميرية ، نوع Spirol 8351 ، إنتاج المملكة العربية السعودية مخصص للبيع في السوق السورية لتصنيع الرخام الصناعي، و هو سائل وردي شفاف ذو كثافة 1.09 g/cm^3 و لزوجة 250-350 cp عند درجة حرارة 25°C

- المادة البادئة: تم استخدام مادة بيروكسيد الميثيل إيثيل كيتون (MEKP) كمادة بادئة لحدوث التفاعلات في المزيج المستخدم ، وهي من نوع (Butanox-M-50)، و يملك نقطة انصهار 79.6 C° و نقطة وميض 7 C° -
- المادة المسرعة: تم استخدام محلول الكوبالت نفتات الحاوي عل نسبة 6% كوبالت، كوسيط معالج مسرّع لعملية بلمرة البولي استر، و يملك نقطة انصهار 150 C° و نقطة وميض 36 C° .
- مواد مألثة: الرمل وبرادة الحديد.
- الألياف الزجاجية: تم استخدام ثلاث أنواع مختلفة من الألياف الزجاجية لتدعيم راتنج البولي استر وهي: الحصيرة (Mat)، النسيج المحاك (Woven Roving)، الألياف أحادية الاتجاه (Unidirectional Fiberglass)، ويوضح الشكل (1) أنواع الألياف الزجاجية المستخدمة.



الشكل (1) أنواع الألياف الزجاجية المستخدمة في العينات (a) عشوائي. (b) موجه. (c) منسوج

❖ تحضير عينات الاختبار:

تم تحضير عينات البولي استر الصفائحية (الطبقيّة) المقواة بألياف الزجاج، في مخبر البلاستيك في وسط غير معزول حرارياً (غير أدبياتي)، بطريقة الدهان اليدوي Hand Lay-up بدرجة حرارة للوسط المحيط ($20-25\text{ C}^\circ$) حيث وضعت كميات مختلفة من البولي استر غير المشبع UPR وأضيفت كل من المادة البادئة البيروكسيدية (MEKP) بنسبة (1.5%) 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 ($20 \times 20\text{ cm}$) ومن ثلاث أنواع مختلفة هي العشوائي (Mat)، المنسوج (Woven)، وأحادي الاتجاه (Unidirectional) .

حضرت عينات الاختبار بطريقة Hand Lay-up الموضحة بالشكل (2) وهي من أقدم الطرق لتشكيل المواد المركبة والتي تتطلب الحد الأدنى من المستلزمات حيث تتضمن إشباع الليف الزجاجي المدعم للتركيب بالراتنج المتصلب حرارياً متضمنة معالجة عند درجة حرارة الغرفة مع أو بدون ضغط خارجي.

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 تشبيح 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 في درجة حرارة الغرفة. تم تحضير ثلاث سلاسل من العينات وفقاً لنوع الألياف الزجاجية وهي: العشوائية، المنسوجة، والألياف أحادية الاتجاه وتحوي كل سلسلة أربع عينات كما يلي: 4، 7، 10، 12 طبقة من الألياف الزجاجية.



الشكل (2) عملية تحضير عينة البولي استر المسلح بالألياف الزجاج وفق طريقة Lay-up.

القسم التجريبي:

اختبار الصدم عالي السرعة Ballistic Impact Test:

تم اختبار العينات على الصدم عالي السرعة من خلال إطلاق الرصاص عليها بشكل عمودي من فوهة سلاح نوع AK-47، قذيفة ذات رأس مدبب عيارها 7.62×39 mm وسرعتها 720 mm، حيث تم الاختبار في ميدان خاص للرمي وكانت المسافة الفاصلة بين السلاح والعينة 10 m ويوضح الشكل (3) صورة توضيحية للسلاح والقذيفة المستخدمة.



الشكل (3) السلاح نوع AK-47 المستخدم في الاختبار (يسار)، قذيفة عيار 7.62×39mm (يمين).

النتائج والمناقشة:

تتعرض الصفيحة الطبقيّة المصنّعة من مواد مركبة (مادة أساس بوليميرية، ألياف تسليح) إلى أنواع مختلفة من الإجهادات عند تعرضها للصدم بسرعات عالية بواسطة قذيفة مدببة الرأس، ونتيجة لذلك يتعرض الهدف إلى أضرار متنوعة وخاصة عند حدوث اختراق. حيث تشير الدراسات المرجعية إلى تعرّض البولي استر غير المشبع للتفتت عند استخدامه كمادة رابطة للألياف، وتعرّض ألياف التسليح الزجاجية إلى التمزق، ونتيجة لتشكل إجهادات قاسية يحدث فصل بين الطبقات بالإضافة إلى أضرار أخرى متنوعة يمكن ملاحظتها بالعين المجردة. وتسبب إجهادات القص الناتجة عن طاقة الصدم حدوث الأضرار السابقة نتيجة التأثير بقوة عالية التركيز على صفيحة لوح الاختبار، حيث تسبب هذه القوة نشوء أنواع مختلفة من القوى، فهي من جهة تساهم بنشوء قوة ضاغطة ومن جهة أخرى ونتيجة رد فعل ألياف التسليح تنشأ قوى شد تسبب حدوث انقطاعها، كما وتساهم قوة صدم القذيفة في نشوء قوى مركزة تسبب تشكيل عزم انحناء مختلفة بالقيمة بين طبقات المادة المركبة، تعمل على فصل هذه الطبقات بعضها عن بعض.

❖ دراسة تأثير نوع الألياف على الضرر على الوجهين الأمامي والخلفي في عينات الاختبار:


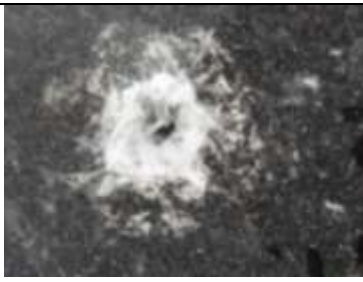
يقدم الضرر المتشكل في عينات الاختبار نتيجة الصدم عالي السرعة (قذيفة سرعتها 720 m/s) فكرة هامة عن طبيعة العينات المصنّعة وقدرتها على مقاومة الاختراق. فكما هو معلوم تمتلك القذيفة طاقة حركية تساوي إلى نصف الكتلة بمربع السرعة وعند اصطدامها بالهدف فإن جزء من هذه الطاقة يتبدد في الهدف. إذا أعاق الهدف مرور القذيفة فهذا دليل على قدرة الهدف على امتصاص كامل الطاقة الصدمية التي تقدمها الطاقة الحركية للقذيفة، أما عندما تتمكن القذيفة من اختراق الهدف، كما هو الحال في عينات الاختبار المدروسة في البحث، فإن جزء من الطاقة الحركية يتبدد في جسم العينة والجزء الآخر المتبقي من الطاقة يسمح للطلقة باستكمال مسارها بعد اختراق الهدف. بشكل عام في المواد المركبة يتم تناول الضرر الحاصل من جزاء القوى الصدمية كدليل على قدرة المادة على امتصاص الطاقة الحركية التي يملكها المقذوف، ويتم تناول مفهوم التشوه بعينة الاختبار من خلال تقييم الضرر الحاصل بالسطح المتلقي لعينة الاختبار والذي يطلق عليه السطح الأمامي Front Face وللسطح الذي تغادره القذيفة يطلق عليه السطح الخلفي Back Face ومن خلال دراسة الفشل الحاصل في تركيب العينة يمكن تفسير وتقييم مدى مقاومة الهدف لمثل هذه الحالة الصدمية التي يمكن أن يتعرض لها الجسم. وعند الحديث عن قذف طلقة رصاص على سطح ما يمكننا أن نميز مسارين مختلفين للطلقة:

- مسار القذيفة عمودي تماماً على سطح الهدف.
- مسار القذيفة يميل بزاوية α عن الأفق.

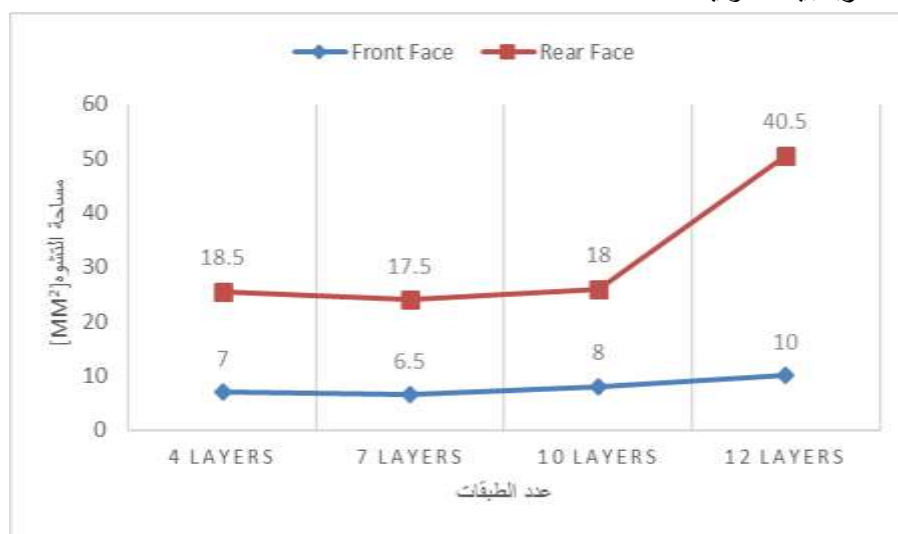
إن مناقشة هاتين الحالتين هام وضروري عند التعامل مع المواد المركبة المسلحة بألياف زجاجية أو كربونية لارتباط الضرر الحاصل بطبيعة القوى المؤثرة وطبيعة القوى الإضافية الناشئة من جراء زاوية الميل α على عملية الاختراق وتشكل قوى قاصة تساهم بالفصل بين طبقات التسليح. أظهرت نتائج الاختبارات التي أجريت على العينات اختلاف بشكل وأبعاد الضرر باختلاف عدد ونوع طبقات التسليح ويظهر الجدول (1) شكل ومساحات التشوه الحاصلة على الوجهين الأمامي والخلفي لبعض عينات الاختبار نتيجة اختبار الصدم عالي السرعة.

الجدول (1) مساحات التشوه على الوجهين الأمامي والخلفي لبعض عينات الاختبار نتيجة الصدم عالي السرعة.

الترج في مساحة الضرر [mm ²]	مساحة الضرر على الوجه الخلفي [mm ²]	مساحة الضرر على الوجه الأمامي [mm ²]	رقم العينة
10	 18	 8	العينة 3 10 طبقات صوف زجاجي عشوائي
35	 69	 34	العينة 6 7 طبقات صوف زجاجي منسوج
238.5	 301	 62.5	العينة 10 7 طبقات صوف زجاجي موجه
13	 18	 5	العينة 13 12 طبقة صوف زجاجي عشوائي+100% رمل

13			العينة 14 12 طبقة صوف زجاجي عشوائي +50% برادة حديد
	18.5	5.5	

ويظهر الشكل (4) تغير مساحة الضرر لعينات مصنوعة من البولي استر غير المشبع كمادة رابطة بدلالة عدد طبقات التسليح بألياف زجاجية عشوائية.



الشكل (4) منحنى تغير مساحة التشوه في الوجهين الأمامي والخلفي لعينات البولي استر المسلح بألياف الزجاج العشوائي.

ويمكن من الشكل ملاحظة ما يلي:

1. زيادة مساحة الضرر على الوجه الأمامي بزيادة عدد الطبقات.
 2. تساوي مساحة الضرر على الوجه الخلفي بالعينات الحاوية على (4,7,10) طبقات تسليح.
 3. نلاحظ أيضاً أن مساحة الضرر على الوجه الخلفي للعينة المسلحة بـ 12 طبقة من الألياف الزجاجية العشوائية أكبر ما يمكن بالمقارنة مع العينات الأخرى المسلحة بعدد طبقات أقل.
 4. نستنتج كذلك أن الاستخدام الأمثل للألياف الزجاجية العشوائية يبدأ بالعينات المسلحة بطبقات من الألياف الزجاجية العشوائية بعد 12 طبقة لأن دور طبقات التسليح في تبديد طاقة القذيفة يبدأ بعد هذا العدد من الطبقات، حيث تشير بعض الدراسات المرجعية [4,5] إلى اعتماد عدد أكبر من الطبقات واستخدام أنواع مختلفة من الألياف مثل ألياف الكربون، الكيفلار، والبولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي.
- تظهر النتائج التجريبية أيضاً والمبينة بالشكل (5) تغير مساحة الضرر الحاصل بعينات مصنوعة من البولي استر غير المشبع والمسلحة بعدد مختلف من طبقات من الألياف الزجاجية المنسوجة.



الشكل (5) منحنى تغير مساحة التشوه في الوجهين الأمامي والخلفي لعينات البولي استر المسلح بألياف الزجاج المنسوج.

يظهر الشكل زيادة مساحة الضرر بالوجهين الأمامي والخلفي بزيادة عدد طبقات التسليح. من الشكل (5)

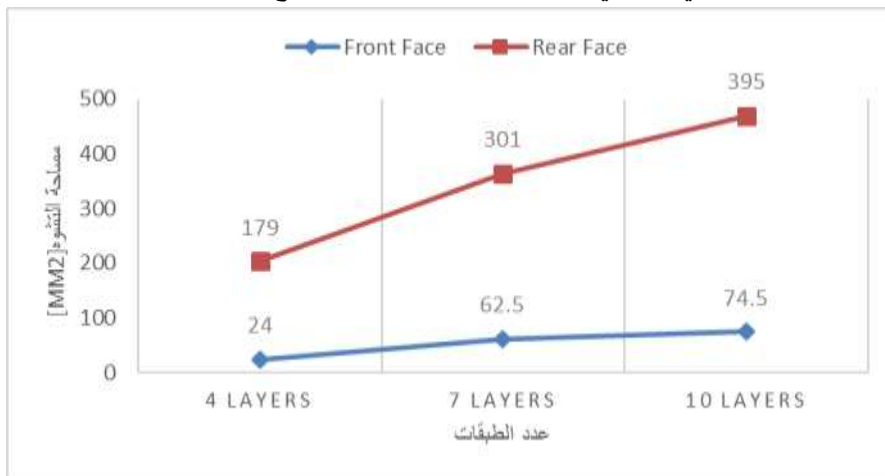
نستنتج الآتي:

(1) زيادة مساحة الضرر بالوجه الأمامي بزيادة عدد طبقات التسليح وهذا دليل على زيادة ممانعة عينة الاختبار للاختراق.

(2) زيادة مساحة الضرر بالوجه الخلفي بزيادة عدد طبقات التسليح وهذا دليل على ازدياد ممانعة عينة الاختبار لعبور القذيفة وعلى ازدياد كمية الطاقة المشتتة ضمن العينة بزيادة عدد الطبقات.

(3) بمقارنة نتائج الشكلين (4) و (5) يمكننا أن نستنتج أن مقاومة العينات المصنعة من طبقات من ألياف منسوجة أفضل من مثيلاتها المسلحة بألياف عشوائية، وأن العينة المسلحة بـ 4 طبقات من الألياف المنسوجة هي أفضل من العينة المسلحة بـ 12 طبقة من الألياف الزجاجية العشوائية.

أظهرت هذه المقارنة أهمية نوعية الألياف الزجاجية المستخدمة في عملية التسليح وللتأكد من صحة هذه النتيجة أجريت دراسات أخرى على نوع ثالث من الألياف المسلحة وهي الألياف الموجهة، حيث يظهر الشكل (6) الضرر المسجل على سطحي عينات الاختبار المسلحة بألياف زجاجية موجهة، وكما هو واضح من الشكل فإن مساحات الضرر المسجلة على السطحين الأمامي والخلفي تزداد بزيادة عدد طبقات التسليح.

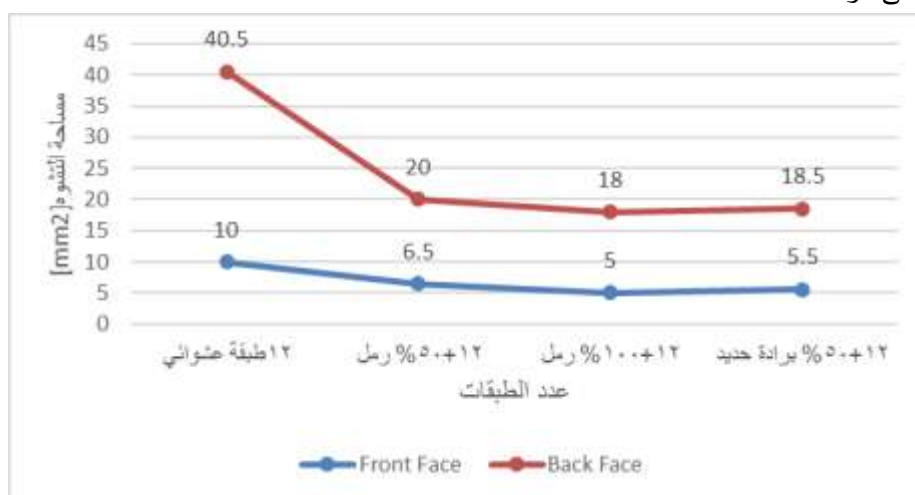


الشكل (6) منحنى تغير مساحة التشوه في الوجهين الأمامي والخلفي لعينات البولي استر المسلح بألياف الزجاج الموجه.

وبمقارنة نتائج الشكل (6) مع الشكلين (4,5) نرى زيادة واضحة بقيم مساحات الضرر في العينات المسلحة بألياف موجهة، كما ويمكن أن نلاحظ الآتي:

1. زيادة مساحة الضرر بزيادة عدد طبقات التسليح بألياف موجهة على السطحين الأمامي والخلفي.
2. إن استخدام 4 طبقات من الألياف الموجهة يكافئ تقريباً من حيث الأداء 12 طبقة من الألياف المنسوجة وأفضل بعدة مرات من العينات المسلحة بـ 12 طبقة من الألياف الزجاجية العشوائية.
3. تبدي العينات المسلحة بألياف زجاجية موجهة مقاومة أكبر عند لحظة الصدم، ويعكس هذا مقدار الضرر المسجل على الوجه الأمامي لعينات الاختبار حيث يلاحظ أن مساحات الضرر المقاسة في العينات المسلحة بألياف موجهة كبيرة وهذا يعني من الناحية العملية أن بدء تشتت الطاقة الحركية للمقذوف تبدأ منذ لحظة التماس الأولى للقذيفة من العينة.

وأما فيما يتعلق بالعينات مع المواد المائلة فيظهر الشكل (7) التأثير السيء لمادتي الرمل وبرادة الحديد على عينة الصوف الزجاجي العشوائي حيث نلاحظ تناقص مساحات التشوه وبالتالي تناقص الطاقة الممتصة مقارنة بالعينة غير الحاوية على مواد مائلة.



الشكل (7) منحنى تغير مساحة التشوه في الوجهين الأمامي والخلفي لعينات 12 طبقة ألياف عشوائية بدلالة نوع ونسبة المادة المائلة.

❖ مناقشة بروفيلات مساحات الضرر الحاصل بعينات الاختبار:

أظهرت التجارب التي أجريت على عينات الاختبار أن كافة العينات تعرضت للتقرب نتيجة العبور الكامل للقذيفة خلالها التي أحدثت ضرراً فيها بأشكال ليست ثابتة نتيجة تغير تركيب هذه العينات. تترك القذيفة أثناء عبورها الهدف أثراً واضحاً على سطحي العينة الأمامي والخلفي يتمثل بترك آثار بمساحات سطحية واضحة المعالم والأبعاد على هذين السطحين. تشير الدراسات المرجعية [6,7,8,9] أن اختلاف المساحات السطحية على وجهي عينة الاختبار يعبر بالواقع عن الآتي:

(1) المساحة السطحية الصغيرة على السطح الأمامي والمساوية للمساحة السطحية للمقطع العرضي يعبر عن أن مقاومة السطح الأمامي منخفضة لمقاومة صدمة المقذوف.

(2) المساحة السطحية الصغيرة للسطح الخلفي تعبر عن أن اختراق القذيفة كان سهلاً وأن جسم الهدف لا يبدي المقاومة المرجوة منه.

يمكن اعتبار الحالتين السابقتين حالتين حديثتين لأن مساحة التشوه الحاصل بالوجهين الأمامي والخلفي تقدم تصوراً أولياً عن مدى مقاومة جسم ما لمثل هكذا حالة إجهادية.

أظهرت نتائج قياس مساحات التشوه الحاصلة بالعينات المدروسة في البحث وجود أنماط مختلفة من العيوب السطحية المسجلة نتيجة اختراق الرصاص لهذه العينات. سيتم الحديث في هذه الفقرة عن مساحات الضرر السطحية دون التطرق إلى العيوب والتشوهات الأخرى الحاصلة في عينة الاختبار، والهدف من هذا هو توضيح ما يلي:

تبيان فيما إذا كان السطح المعرض للمقذوف سهل الاختراق أم أنه يبدي مقاومة تعادل مقدار الطاقة الحركية المفقودة منذ لحظة دخول القذيفة. فإذا كان المقطع المعرض للقذيفة وللأثر الابتدائي المسجل متساويان فإن السطح الأمامي غير مقاوم، أما إذا كان الأثر المسجل على السطح الأمامي ذو مقطع عرضي أكبر من المقطع العرضي للمقذوف فإن جزءاً من الطاقة الحركية للقذيفة قد امتص من قبل السطح الأمامي، وفي هذه الحالة ينبغي تسليط الضوء على العيوب السطحية المسجلة. من الطبيعي أن يمتص الجسم الصلب جزءاً من الطاقة الحركية للقذيفة، وأحياناً وعند عدم تمكن القذيفة من الاختراق نقول إن الجسم امتص طاقة الصدمة بشكل كامل.

في الدراسة التجريبية التي أجريت على المواد المركبة فإن القذيفة تمكنت من اختراق كامل العينات المدروسة وسجلت أنماطاً مختلفة من الفشل استناداً لطبيعة المادة المركبة. ويوضح الشكل (8) بعض أنماط الفشل والتشوه الحاصل في العينات كالفصل الطبقي، قص الألياف وانتهيارها بالشد والضغط. يعتبر الأثر المسجل على السطح الخلفي من الأمور اللازم قراءتها لأنها تعبر عن مدى تفريغ الطاقة الحاصل بعينة الاختبار. فالدراسات المرجعية [8,9] تشير إلى أنه كلما كان الأثر المسجل على السطح الخلفي كبيراً كلما كان ضياع الطاقة الحركية كبيراً والعكس صحيح.



الشكل (8) بعض أنماط التشوه لعينات الاختبار.





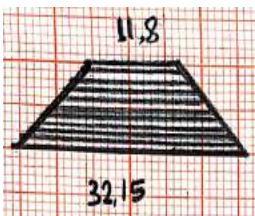

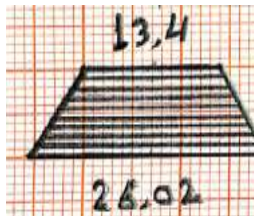
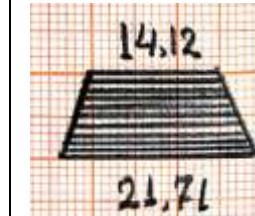
يُعمد الفرق بمساحة الضرر بين الوجهين الأمامي والخلفي كمقياس أيضاً في تقييم مقاومة الجسم للاختراق. فكلما كان الفرق كبيراً كانت قيمة الطاقة الحركية للمقذوف والمتبددة في الجسم كبيرة. استناداً للدراسة المرجعية [3] يمكننا أن نميز نوعين من أنماط الضرر المسجلة في عينات الاختبار المحضرة من مواد مركبة وهي على الشكل التالي:

(1) نمط الضرر على شكل جذع مخروط قاعدته الصغرى تقع على الوجه الأمامي وقاعدته الكبرى على السطح الخلفي للجسم. في حال تساوي مساحة الضرر الموجودة على السطحين فإن الجسم لا يبدي أية ممانعة لعبور القذيفة، وكلما كانت مساحة الضرر المسجلة على السطح الخلفي أكبر فهذا دليل على أن جسم عينة الاختبار يفرغ جزء من الطاقة الحركية فيه، والعكس صحيح.

(2) نمط الضرر على شكل الساعة الرملية وهي تمثل جذعي مخروط متعاكسين مرتبطين بسطح مشترك. تظهر التجارب التي أجريت على عينات الاختبار تأثيراً واضحاً على أنماط الضرر المسجلة بدلالة نوع الألياف الزجاجية وعدد طبقات التسليح. وكما هو مبين في الجدول (2) فإن أنماط الضرر الملاحظة في العينات المسلحة بألياف زجاجية عشوائية هي من نوع جذع المخروط في كافة العينات، أما مساحة الضرر المسجلة على السطح الأمامي فتتدرج بشكل طفيف بالانخفاض مع زيادة عدد طبقات التسليح، ويمكن اعتبار هذا التدرج ثابت، في حين تظهر أشكال مساحات الضرر قيم متفاوتة على السطح الخلفي، وأن العينة الحاوية على 12 طبقة تسليح تمتلك أكبر قيمة مسجلة لمساحة الضرر.





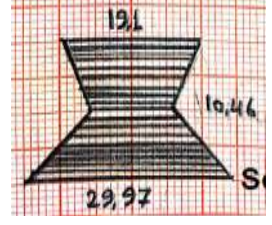
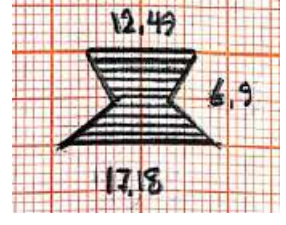
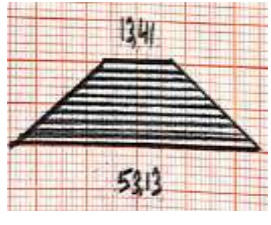
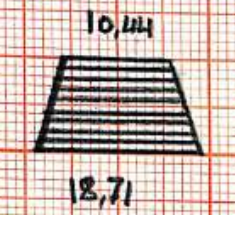
تظهر النتائج المبينة في الجدول أيضاً أن العمل بألياف تسليح عشوائية يتطلب استخدام طبقات تسليح أكثر من المشار إليها (أي أكثر من 12 طبقة)، وأن التباينات الطفيفة الملاحظة في النتائج هنا يمكن أن تؤول لعدة أسباب نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر: وجود عيوب في العينات (فقاعات هوائية، حالة عدم اشباع بالراتنج) أو وجود انحراف في مسار القذيفة.

الجدول (2) شكل وأبعاد المقاطع العرضية لأنماط الضرر المسجلة في عينات البولي إستر غير المشبع المسلحة بطبقات من الألياف الزجاجية العشوائية.

العينة 4 12 طبقة صوف زجاجي عشوائي	العينة 3 10 طبقات صوف زجاجي عشوائي	العينة 2 7 طبقات صوف زجاجي عشوائي	العينة 1 4 طبقات صوف زجاجي عشوائي
			
S = 4.79 mm	S = 3.42 mm	S = 3.11 mm	S = 2.55 mm
			

بهدف تحديد وقياس أنماط الضرر المشكلة في عينات الاختبار المسلحة بعدة طبقات من الألياف الزجاجية المنسوجة فإن الجدول (3) يظهر تأثير واضح لنوع وعدد طبقات الألياف المنسوجة على أنماط الضرر المسجلة بالعينات. حيث يظهر أن العينات المسلحة بـ (7 & 4) طبقات ألياف تبدي نمط للضرر من نوع الجذع المخروطي أما العينات المسلحة بأكثر من ذلك (12 & 10) طبقة فإنها تمتلك نمط الساعة الرملية.




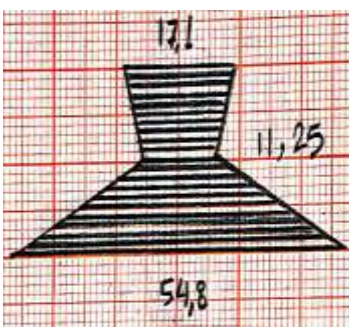
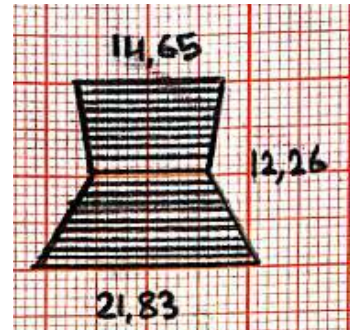
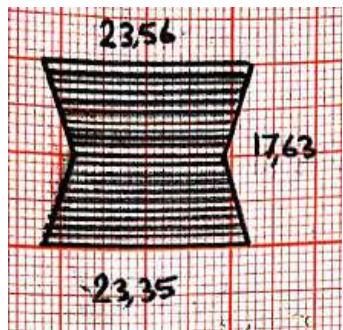
الجدول (3) شكل وأبعاد المقاطع العرضية لأنماط الضرر المسجلة في عينات البولي استر غير المشبع المسلحة بعدد مختلف من طبقات الألياف الزجاجية المنسوجة.

العينات 8 12 طبقة صوف زجاجي منسوج	العينات 7 10 طبقات صوف زجاجي منسوج	العينات 6 7 طبقات صوف زجاجي منسوج	العينات 5 4 طبقات صوف زجاجي منسوج
			
S = 9.58 mm	S = 8.6 mm	S = 6.04 mm	S = 3.52 mm
			

إن نمط الضرر جذع المخروط يدل بالواقع على أن سماكات العينات المدروسة صغيرة أما نمط الساعة الرملية فيظهر بالواقع في العينات السميكة وذلك عند التسليح بألياف زجاجية عشوائية أو منسوجة حتى عدد طبقات للتسليح 7 طبقات حيث سماكة العينات أصغر من (6 mm)، أما عندما تزيد السماكة عن ذلك في العينات المسلحة بعدد طبقات منسوجة (10 & 12) طبقة تسليح فيلاحظ نمط الساعة الرملية [3].

يظهر الجدول (4) أنماط الضرر المسجلة في عينات الاختبار المسلحة بألياف زجاجية موجهة. وكما هو واضح فإن سماكة العينات تتراوح بين (S = 7.53 mm إلى S = 16.71 mm) وهي جميعها تبدي نمطاً واحداً للضرر وهو نمط الساعة الرملية، وهذا يؤكد النتيجة التي توصلنا إليها وهي ضرورة أن تكون السماكة أكبر من (6 mm) حتى تبدي هذا النوع من الضرر.

الجدول (4) شكل وأبعاد المقاطع العرضية لأنماط الضرر المسجلة في عينات البولي استر غير المشبع المسلحة بعدد مختلف من طبقات الألياف الزجاجية الموجهة.




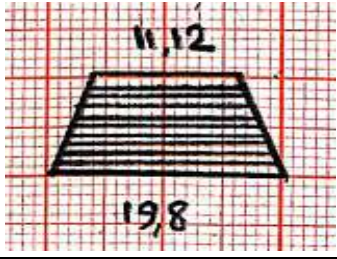
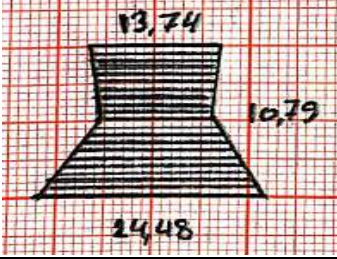
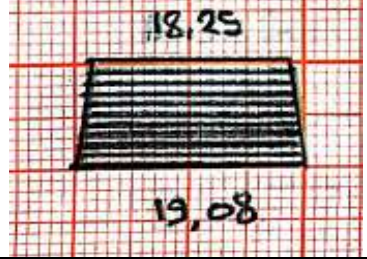
العينة 11 10 طبقات صوف زجاجي موجه	العينة 10 7 طبقات صوف زجاجي موجه	العينة 9 4 طبقات صوف زجاجي موجه
		
S = 16.71 mm	S = 12.16 mm	S = 7.53 mm
		

أظهرت النتائج التي تناولت اختبار العينات المسلحة بألياف زجاجية عشوائية والحاوية على نسب مختلفة من

المواد المألثة (رمل البحر، برادة الحديد) وجود أنماط مختلفة من الضرر الناتج عن الصدم. فكما هو واضح من الأشكال في الجدول (5) فإن تأثير سماكة العينات واضح على نمط الفشل، فالعينة ذات السماكة الأكبر من (6 mm) تبدي نمط الساعة الرملية في حين العينات الأخرى تبدي نمط جذع المخروط.

إن مقارنة العينة رقم (4) المسلحة ب 12 طبقة من الألياف الزجاجية العشوائية مع العينة رقم 12 المسلحة بنفس عدد الطبقات والحاوية على 50% رمل البحر تظهر أن نمط الضرر المسجل في العينتين هو واحد (نمط جذع المخروط)، إلا أن وجود الرمل كمادة مألثة قد أساء جداً للعينة حيث تشير النتائج المسجلة على العينة رقم (12) إلى عبور واختراق القذيفة دون حدوث أية مقاومة من طبقات التسليح، ويمكن تفسير هذا استناداً لانخفاض طاقة الارتباط اللازم توفرها بين مادة UPR والمادة المألثة، فمادة UPR لها قدرة على ضم مثل هذه المواد بنسبة قد تصل إلى 200% ولكن الضرر الحاصل في العينات نتيجة القذيفة يبين حدوث اختراق دائري قطره يساوي تقريباً قطر القذيفة وهذا دليل على انعدام مقاومة المواد التي على أساسها تم إضافة كل من الرمل والحديد ويؤكد هذا انعدام الضرر في مناطق مجاورة لعبور القذيفة. ومن جهة أخرى تشير القيم المسجلة للعينة رقم (13) والحاوية على 100% من رمل البحر إلى أن سماكة العينة تلعب دوراً في تحويل نمط جذع المخروط إلى نمط الساعة الرملية.

الجدول (5) شكل وأبعاد المقاطع العرضية لأنماط الضرر المسجلة في عينات البولي استر غير المشبع المسلحة بعدد مختلف من طبقات الألياف الزجاجية العشوائية بالإضافة إلى المواد المألثة .

العينة 14 12 طبقة صوف زجاجي عشوائي+50% برادة حديد	العينة 13 12 طبقة صوف زجاجي عشوائي+100% رمل	العينة 12 12 طبقة صوف زجاجي عشوائي+50% رمل
		
S = 5.52 mm	S = 10.32 mm	S = 6.05 mm
		

الاستنتاجات والتوصيات:

1. إن زيادة عدد طبقات اللوح الصفائحي تزيد من مقاومته وقدرته على امتصاص طاقة الحمل المعرض له سواء كان ستاتيكي أو ديناميكي .
2. إن إضافة بعض المواد المألثة (رمل البحر، برادة الحديد في هذا البحث) قد أساءت إلى خواص عينات البولي استر المسلح بالألياف الزجاجية من حيث المتانة والمقاومة والوزن.
3. بينت دراسة نتائج اختبار الصدم عالي السرعة وجود أنماط مختلفة ومعقدة للضرر والتشوه الحاصل في العينات وتعتبر هذه الأنماط ميكانيزمات فعالة لامتصاص طاقة الصدم وتختلف باختلاف نوع الألياف الزجاجية المستخدمة، حيث أظهرت الألياف الموجهة أكبر مساحات للضرر والتشوه وبالتالي أعلى قدرة على امتصاص طاقة الأحمال.
4. تؤثر سماكة العينات على شكل بروفيلات الضرر عند إجراء مقاطع عرضية في أماكن اختراق القذيفة للعينة، حيث أن العينات ذات السماكة أكبر من 6mm أظهرت نمط الساعة الرملية لبروفيل الضرر بينما العينات ذات السماكة أقل من 6mm أظهرت نمط جذع المخروط وهذا يتطابق مع الدراسات المرجعية.
5. تعتبر هذه الألواح غير كافية كبنية مستقلة لمقاومة قذائف عالية السرعة وإنما تمثل جزء مهم لا ينجزاً من بنية درع مضادة للصدم القذائفي.

ومنه نوصي بمايلي:

- العمل على إضافة عدة طبقات من مواد أخرى إلى البنى المحضرة في هذا البحث، كأجرات السيراميك، طبقات من المطاط، وطبقات مقاومة للنيران للحصول على بنية درع المواد المركبة الذي أصبح بديلاً لدرع المواد المعدنية التقليدي في الدول المتقدمة.
- دراسة تأثير زوايا تنضد الألياف الموجهة على أنماط وطبيعة الأضرار المتشكلة في العينات، واستخدام النمذجة بواسطة برامج مثل ANSYS أو ABAQUS لمقارنة النتائج.

المراجع:

- [1] NAIK, K; SHRIRAO, P. *Composite structures under ballistic impact*. Composite Structures 66, 2004, 579-590.
- [2] GOWER, L; CRONIN, S; PLUMTREE, A. *Ballistic impact response of laminated composite panels*. International Journal of Impact Engineering 35, 2008, 1000-1008.
- [3] REDDY, R; REDDY, S; MADHU, V; GOGIA, K; RAO, K. *Behaviour of E-glass composite laminates under ballistic impact*. Materials and Design 84, 2015, 79-86.
- [4] BIENIAS, J; JAKUBCZAK, P; SUROWSKA, B; DRAGAN, K. *Low-energy impact behavior and damage characterization of carbon fiber reinforced polymer and aluminium hybrid laminates*. Archives of Civil and Mechanical Engineering 15, 2015, 925-932.
- [5] BALAGANASEAN, G; VELMURUGAN, R; SRINIVASAN, M; GUPTA, N; KANNY, K. *Energy absorption and ballistic limit of nanocomposite laminates subjected to impact loading*. International Journal of Impact Engineering 74, 2014, 57-66.
- [6] MUNOZ, R; HERGUETA, F; GALVEZ, F; GONZALEZ, C; LLORCA, J. *Ballistic performance of hybrid 3D woven composites: Experiments and simulations*. Composite Structures 127, 2015, 141-151.
- [7] HAIJUN, X; LULU, L; GUANGATAO, C; NA, Z; YIMING, F; WEIRONG, H. *Impact responses and damage evolution of triaxial braided carbon/epoxy composites*. Part I: Ballistic impact testing. Textile Research Journal, 83, 16, 2013, 1703-1716.
- [8] RAZALI, N; SULTAN, M; MUSTAPHA, F; YIDRIS, N; ISHAQ, M. *Impact damage on composite structures - A review*. International Journal of Engineering and Science (IJES), 37, 2014, 08-20.
- [9] YAHAYA, R; SAPUAN, M; JAWAID, M; LEMAN, Z; ZAINUDIN, S. *Measurement of ballistic impact properties of woven kenaf-aramid hybrid composites*. Measurement 77, 2016, 335-343.