



## المجلة العلمية لجامعة الملك فيصل The Scientific Journal of King Faisal University

العلوم الأساسية والتطبيقية  
Basic and Applied Sciences



### Preparation and Mechanical Characterisation of Basalt Fabric, Epoxy, and Silicon Dioxide Composite Materials

Mohamad Barkat Ibrahim, Hussein Yousef Habib and Rafi Mousa Jabrah  
Department of Applied Physics, Materials Sciences and Engineering, Higher Institute for Applied Sciences and Technology, Damascus, Syria

### تحضير مواد مركبة من نسيج ألياف البازلت والإيبوكسي وأكسيد السيليكون وتوصيف خواصها الميكانيكية

محمد بركات إبراهيم وحسين يوسف حبيب ورفيع موسى جبره  
قسم الفيزياء التطبيقية، علوم وهندسة المواد، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق، سوريا

#### KEYWORDS الكلمات المفتاحية

Nano silica, micro silica, impact test, charpy method, flexural test, interface  
سيليكا نانوية، سيليكا ميكروية، اختبار الصدم، طريقة شاربي، اختبار الانعطاف، السطح البيني

#### RECEIVED الاستقبال

20/09/2020

#### ACCEPTED القبول

21/10/2020

#### PUBLISHED النشر

01/12/2020



<https://doi.org/10.37575/b/sci/0007>

#### ABSTRACT

This work aims to prepare composite materials from woven basalt fabric and epoxy using the hand lay-up method to investigate the effect of the epoxy content and heat treatment on their mechanical properties. It was found that heat treatments of 60 °C for five hours improve mechanical properties. The best epoxy impregnation ratio, in terms of mechanical properties, is 40 wt%. Then, nanocomposite materials were prepared by adding nano- and micro-silicon dioxide to epoxy and basalt-epoxy 40 wt% composite material. The effect of silica on the prepared composite materials' mechanical properties was also investigated. It was found that the best silica loading content was 0.5% nano-silica based on the epoxy weight, as its addition improved the impact resistance of the composite basalt-epoxy 40 wt% material by more than 19%. The flexural modulus of the same composite material increased by 10%, and the flexural stress increased by approximately 35%. These results permit the use of this composite material in wider mechanical applications and open the door for the investigation of other mechanical properties of these materials.

#### المخلص

يهدف هذا البحث إلى تحضير مواد مركبة بالطريقة اليدوية (Hand lay up) من نسيج ألياف البازلت المنسوج والإيبوكسي، ودراسة تأثير نسبة الإيبوكسي والمعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية لهذه المادة المركبة. وقد وجد أن المعالجة الحرارية عند الدرجة 60 °C لمدة خمس ساعات تحسن الخواص الميكانيكية وأن أفضل نسبة تشريب بالإيبوكسي من حيث معظم الخواص الميكانيكية هي 40% من وزن المادة المركبة. تلا ذلك تحضير وتوصيف مواد مركبة نانومترية وذلك بإضافة أكسيد السيليكون النانوي (السيليكا النانوية) إلى الإيبوكسي وإلى المادة المركبة ألياف البازلت إيبوكسي 40% وكذلك درس تأثير إضافة السيليكا الميكروية بهدف مقارنة تأثير كل من الأكسيدات على الخواص الميكانيكية للمواد المركبة المحضرة وتبين أن أفضل نسبة تحميل بالسيليكا تعود للسيليكا النانوية المضافة بنسبة 0.5% من وزن الإيبوكسي إذ حسنت إضافتها مقاومة الصدم للمادة المركبة (ألياف بازلت إيبوكسي 40%) بنسبة تفوق 19% كما حسنت معامل الانعطاف لنفس المادة المركبة بنسبة 10% ومقاومة الانعطاف بنسبة 35% تقريباً مما يسمح بتوظيف هذه المادة المركبة في تطبيقات ميكانيكية أوسع بعد تحسن خواصها وكذلك يفتح الباب لدراسة خواص ميكانيكية أخرى لهذه المواد.

#### 1. المقدمة

تحتاج بعض التطبيقات الهندسية الميكانيكية أحياناً إلى خواص يصعب اجتماعها في مادة واحدة، إذ تحتاج تطبيقات الطيران والفضاء إلى مواد متينة وخفيفة الوزن ومقاومة للاهتزازات والاحتكاك وللتغيرات المفاجئة في الضغط ودرجة الحرارة، ويصعب إيجاد هكذا مواصفات في المواد التقليدية. لذلك ظهرت المواد المركبة التي تُعرف بأنها اجتماع مادتين أو عدة مواد مختلفة عن بعضها البعض في الخواص الفيزيائية أو الكيميائية عبر سطح بيني يهدف الحصول على مادة جديدة تتفوق في أدائها على مكوناتها منفردة، شريطة ألا تتحلل أو تتفاعل هذه المواد مع بعضها البعض (Clyne, T.W. and Hull., 2019). لذلك تكون المواد المركبة غالباً غير متماثلة المناحي. يحدث اجتماع مكونات المواد المكونة على مستويات بنوية مختلفة تبدأ من المقياس الجبري الماكروي (Macroscopic scale) إلى المقياس الميكروي (Microscopic scale) وحتى المقياس النانومتري (Nanometric scale) (Clyne, T.W. and Hull., 2019; Gibson., 2010). تتكون المواد المركبة من مادة أو أكثر غير مستمرة موزعة في مادة أخرى مستمرة. وفي الحالة العامة، تكون المادة غير المستمرة أكثر متانة من المادة المستمرة. ولهذا، يُطلق على المادة غير المستمرة اسم مادة التقوية، وتكون في أشكال متعددة كالحبيبات (Particulates) والجسيمات الصفيحية (Flakes) والألياف (Fibers) والصفيحات (Laminates) (Clyne, T.W. and Hull., 2019)، يُطلق على المادة المستمرة اسم المادة الرابطة (Matrix) أو الحاضنة لمادة التقوية، ويكمن دورها في ضمان تماسك المادة المركبة وحمايتها من العوامل الخارجية. تتألف المادة المركبة من ثلاث مناطق محددة وهي المادة المستمرة والمادة غير المستمرة والسطح البيني (Interface)، ويلعب السطح البيني دوراً هاماً في تحديد خواص المادة المركبة وسلوكها (Clyne, T.W. and Hull., 2019; Gibson., 2010). تُصنّف المواد المركبة عموماً تبعاً لنوع المادة الرابطة، لذلك توجد مواد مركبة ذات رابط معدني، ومواد مركبة ذات رابط سيراميكي، ومواد مركبة ذات رابط بوليميري (Jones, R.M., 1998). وتعد المواد المركبة ذات

الرابط البوليميري أكثر المواد المركبة استعمالاً، ويكمن الهدف الأساسي من تشكيل هذه المواد في تحسين الخواص الميكانيكية للبوليميرات (Clyne, T.W., 2019). تستخدم الألياف كمادة تقوية بكثرة في صناعة المواد المركبة ذات الرابط البوليميري، وبشكل أساسي الألياف عالية الأداء مثل ألياف الكفلاز وألياف الزجاج وألياف البازلت. إذ تتميز ألياف البازلت بتكلفة الإنتاج المنخفضة مقارنة مع غيرها من الألياف وبخواصها الميكانيكية العالية فقد دخلت المواد المركبة ألياف بازلت/إيبوكسي في بعض التطبيقات الخاصة في مجالات الفضاء والطيران وحديثاً في مجال البناء وصناعة قضبان بدلية عن القضبان المعدنية (Dhand et al., 2015; Liu et al., 2006). كما تُستخدم الحبيبات والمساحيق لتقوية البوليميرات أو تحسين خواص أخرى كالعزل الحراري أو زيادة مقاومة الخدوش (Matytkiewicz, 2020). عندما تكون أبعاد هذه الحبيبات أصغر من 100nm يُطلق على هذه المادة المركبة اسم المادة المركبة النانومترية (Nano composite material) وتتميز مواد التقوية النانوية بسطح نوعي كبير جداً بسبب صغر أبعاد الحبيبات، وبالتالي، تزداد التأثيرات المتبادلة بين مواد التقوية والبوليمير الرابط (matrix) (Ciprari et al., 2006). عملت عدة جهود على تحضير وتوصيف مواد مركبة مختلفة من ألياف البازلت والإيبوكسي فعلى سبيل المثال في دراسة Routray et al. (2015) درسوا تأثير عدد طبقات صفائح ألياف البازلت المنسوجة واتجاهها على الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة ألياف بازلت/إيبوكسي، وأثبتوا أن الخواص الميكانيكية تزداد بازدياد عدد الطبقات وعند تغيير اتجاهها بمقدار 90° درجة أما Dorigato, A. and Pegoretti. (2012) فقد أجروا دراسة مقارنة لصفائح المواد المركبة ألياف بازلت/إيبوكسي وألياف زجاج نوع E/إيبوكسي وألياف كربون/إيبوكسي، وبينوا تفوق المادة المركبة ألياف بازلت/إيبوكسي على المادة المركبة ألياف زجاج/إيبوكسي بالنسبة لمعامل المرونة وخواص التخميد وأن خواص الشد للمادة المركبة ألياف بازلت/إيبوكسي تقارب قيم الشد للمادة المركبة ألياف كربون/إيبوكسي. وقد خلصت دراسة Spagnuolo et al. (2011) أن المواد المركبة ألياف بازلت/إيبوكسي تشكل بديلاً مقبولاً عن المواد المركبة ألياف

صدم الإيبوكسي الصافي مع مقاومة صدم عينات مواد مركبة إيبوكسي-سيليكا. لتحضير المواد المركبة إيبوكسي-سيليكا، يُمزج السيليكا مع راتنج الإيبوكسي ويُحرك المزيج جيداً بواسطة الخلاط الميكانيكي، فتتشكل نتيجة المزج فقاعات هوائية تُشكل في حال بقائها نقاط ضعف في المادة المركبة وتُضعف الخواص الميكانيكية. لذلك، ينبغي التخلص منها باستخدام جهاز تخلية الذي يخفض الضغط، وبالتالي، يساعد على سحب الفقاعات إلى سطح المزج السائل. ثم، باستخدام جهاز البعثة بالأمواج فوق الصوتية، يجري إخراج الفقاعات الهوائية من المزيج كما تتحسن بعثرة السيليكا ضمن الإيبوكسي بفضل الأمواج فوق الصوتية. بعد ذلك يُضاف المقسي ويُحرك المزيج جيداً حتى حدوث التجانس ثم يُصب في قالب سيليكوني. بعد تصلب العينات في القالب، يجري إخراجها منه بيسر.

#### 2.4. تحضير مواد مركبة ألياف بازلت/إيبوكسي/سيليكا:

جرى تحضير هذه المواد المركبة بطريقة مشابهة لطريقة تحضير المواد المركبة ألياف بازلت/إيبوكسي، ولكن هنا يجري إشباع الألياف بمزيج الإيبوكسي-سيليكا الذي تم شرح طريقة تحضيره سابقاً. جرى ترميز عينات المواد المركبة على النحو التالي: BA\_Ep(T)x%\_S(r)y% حيث يشير T إلى المعالجة الحرارية و x إلى النسبة المئوية الوزنية للإيبوكسي، و y إلى النسبة المئوية الوزنية للسيليكا، و r إلى قطر حبيبات السيليكا (nm).

#### 2.5. التوصيف الميكانيكي:

قيست مقاومة الصدم بطريقة شاربي باستخدام آلة اختبار الصدم طراز JBW300. يسمح المعيار الدولي ISO 179-1 باختبار عينات الصدم بدون فتح ثلم فيها، وتكون عينات اختبار الصدم ذات شكل متوازي المستطيلات وأبعادها (60mm\*10 mm\*d mm)، حيث d هي سماكة العينة، وهي تختلف حسب المادة المُختبرة سواء كانت إيبوكسي أو مادة مركبة وحسب المادة الرابطة في المواد المركبة. تمثل قيمة مقاومة الصدم (واحدتها KJ/m<sup>2</sup>) المتوسط الحسابي لقيم مقاومة الصدم لخمس عينات وتُعطى بالعلاقة التالية:

$$IRe = \frac{AE}{b \cdot d} \times 1000$$

حيث AE هي الطاقة المُمتصة (واحدتها J) و b و d هما عرض وسماكة العينة على الترتيب.

قيست خواص الانعطاف باستخدام آلة الاختبارات الميكانيكية العامة طراز WDW-50 المزودة بتجهيزات اختبار الانعطاف ثلاثي النقاط.

عينات اختبار الانعطاف ثلاثي النقاط ذات شكل متوازي مستطيلات وأبعادها لكل من المواد المركبة والإيبوكسي هي (60mm\*10 mm\*d mm) حيث d هي سماكة العينة. يجري اختبار الانعطاف بسرعة تحميل 2mm/min. تُحسب خواص الانعطاف من منحنى الإجهاد-تشوه وهي معامل مرونة الانعطاف (Flexural modulus)، واحدتها MPa،  $\sigma_f$  مقاومة الانعطاف (Flexural stress) واحدتها MPa،  $\epsilon_f$  التشوه عند الكسر (Flexural strain) وتُحسب المعاملات السابقة بالعلاقات التالية:

$$E_{bending} = \frac{F \cdot L^3}{\delta \cdot 4bd^3}$$

حيث  $\frac{F}{\delta}$  ميل مستقيم القوة-استطالة في المنطقة الخطية، L, b & d سماكة وعرض وطول العينة على الترتيب وواحدتهم mm.

$$\sigma_f = \frac{1.5F_{max}L}{bd^2}$$

حيث  $F_{max}$  القوة المطبقة عند انكسار العينة (N).

$$\epsilon_f = \frac{6\delta_{max}d}{L^2}$$

التشوه عند الكسر.

زجاج نوع S<sub>2</sub>/إيبوكسي في التطبيقات العسكرية كتصفيح المركبات وصناعة السترات الواقية من الرصاص. أما دراسة Kuzmin et al. (2017) فقد وضحا فائدة المعالجة السطحية لأكسيد السيليكون النانوي بعوامل الربط السيلانية لتحسين الخواص الميكانيكية للمواد المركبة ألياف بازلت/إيبوكسي. في حين هدفت دراسة Ibrahim et al. (2020) إلى تجهين نسيج ألياف الكفلار مرتفع الثمن مع نسيج ألياف الزجاج الأقل تكلفة لتشكيل مادة مركبة مع الإيبوكسي وتغيير نسب المواد الداخلة في تحضير هذه المواد المركبة الهجينة للحصول على مادة مركبة خفيفة ذات خواص ميكانيكية جيدة وبتكلفة منخفضة. تتصف معظم المواد المركبة المحضرة في الدراسات السابقة بخواصها الميكانيكية العالية لكن تكلفة إنتاجها مرتفعة، لذلك يهدف هذا البحث إلى الحصول على مواد مركبة ذات خواص ميكانيكية عالية وبتكلفة منخفضة قدر الإمكان من خلال استخدام السيليكا النانوية والميكروية غير المعدلة سطحياً والتي تعتبر كلفتها منخفضة نسبياً بالمقارنة مع السيليكا المعدلة سطحياً، وكذلك استخدام طريقة التشكيل اليدوي التي لا تتطلب تجهيزات وأدوات خاصة ويمكن تنفيذها ضمن بيئة عمل غير معقدة. تتضمن هذه الدراسة تحضير خمسة أنواع رئيسية مختلفة من المواد المركبة وهي: ألياف بازلت/إيبوكسي، ألياف بازلت/إيبوكسي/سيليكا ميكروية، ألياف بازلت/إيبوكسي/سيليكا نانوية، إيبوكسي/سيليكا ميكروية، إيبوكسي/سيليكا نانوية. ثم تغيير نسب المواد الأولية المستخدمة في تحضير كل نوع من هذه المواد المركبة، ومن ثم اختبار خواص الصدم للمواد المركبة إيبوكسي/سيليكا، واختبار خواص الصدم والانعطاف للمواد المركبة ذات الألياف.

## 2. المواد وطرائق العمل

### 2.1. المواد:

جرى تأمين نسيج الألياف البازلتية من شركة Basaltex NV البلجيكية وله المواصفات التالية (التركيب النسيجي مبرد 2/2 والكثافة 2.75 g/cm<sup>3</sup> والكثافة السطحية 900 g/m<sup>2</sup> وسماكة النسيج 0.7 mm). جرى استخدام الإيبوكسي كمادة رابطة نوعه Araldite® LY 5052 ونوع عامل التصالب Aradur® 5052 وقد جرى تأمينهم من شركة Huntsman الألمانية. جرى استعمال نوعين من السيليكا كمواد تقوية حبيبية، النوع الأول ذو قطر حبيبات ميكرومي 0.4µm أي ما يعادل 400nm، تتمتع بسطح نوعي قدره 30m<sup>2</sup>/g وكثافة حجمية (bulk) 0.72g/cm<sup>3</sup> والنوع الثاني هو سيليكا نانوية (AEROSIL® 200 Hydrophilic Fumed Silica) أبعاد حبيباتها 14nm من إنتاج شركة Evonik Degussa، تتمتع بسطح نوعي قدره 200m<sup>2</sup>/g وكثافة حجمية (bulk) 0.03g/cm<sup>3</sup>. جرى استعمال الأستيون التجاري لتنظيف الأدوات المخبرية المستخدمة.

### 2.2. تحضير مواد مركبة ألياف بازلت/إيبوكسي:

جرى تحضير عينات مواد مركبة ألياف بازلت/إيبوكسي مؤلفة من ثلاث طبقات من نسيج الألياف. في البداية، تُقَص ثلاث طبقات من نسيج الألياف بواسطة مقص عادي وبأبعاد (130×130)mm<sup>2</sup>. تُوزن كل طبقة من الألياف على حده، ثم يُحسب وزن الإيبوكسي المطلوب لإشباع كل طبقة، كما تُحسب كمية المقسي من وزن الإيبوكسي بنسبة 27.5% وزناً، وذلك حسب توصيات الشركة المصنعة. يُمزج المقسي مع الإيبوكسي، وتُشرب كل طبقة من الطبقات الثلاث بكمية الإيبوكسي اللازمة وتُنصَد فوق بعضها البعض داخل قالب معدني، ثم يُوضَع ثقل فوق العينة الناتجة من أجل تحسين التماسك والترص وإخراج الفقاعات الهوائية من العينة. بعد أن يتصلب الإيبوكسي يُزال الثقل وتُنزَع العينة الصلبة والمتماسكة من القالب. تجري معالجة صفائح المواد المركبة المراد معالجتها حرارياً لمدة 5 ساعات عند الدرجة 60 °C، ثم تُقَص خمس عينات صدم وخمس عينات انعطاف من كل صفيحة على شكل متوازي مستطيلات بواسطة منشار ترددي.

### 2.3. تحضير مواد مركبة إيبوكسي/سيليكا:

في البداية، حُضرت خمس عينات صدم من الإيبوكسي الصافي دون إضافات من خلال مزج الإيبوكسي مع المقسي وذلك من أجل مقارنة مقاومة

تتصف السيليكا بضعف التأثيرات المتبادلة سيليكاً-بوليمير، وبقوة التأثيرات المتبادلة سيليكاً-سيليكاً، وهذا ما يبرر ارتفاع لزوجة الإيبوكسي عند إضافة السيليكا وعدم ضمان ابتلال دقائق السيليكا وضعف السطح البيني سيليكاً-إيبوكسي، بسبب كون السيليكا المستخدمة غير معدلة سطحياً، أي تميل السيليكا إلى تشكيل تكتلات وتجمعات مع بعضها البعض على شكل عنقايد ضمن المادة الرابطة (Rahman and Padavettan, 2012)، وهذا ما يُضعف المادة المركبة وقد يُخفّض مقاومة الصدم.

يُشار إلى أن تأثير العاملين السابقين على المواد المركبة إيبوكسي-سيليكاً، قد يختلف حسب طرائق التحضير وأبعاد حبيبات السيليكا المستعملة ونسبتها، وكذلك حسب الاختبار المُطبق. لذلك، فقد يزداد أو يُهمل تأثير أحدهما على حساب الآخر. يبين جدول (3) متوسطات مقاومة الصدم لعينات مواد مركبة بازلت-إيبوكسي 40% سيليكاً 14nm وبازلت-إيبوكسي 40% سيليكاً 400nm بدلالة نسبة السيليكا.

جدول (3): نتائج مقاومة الصدم لعينات مواد مركبة ألياف بازلت-إيبوكسي-سيليكاً

SD(KJ/m <sup>2</sup> )	En(KJ/m <sup>2</sup> )	العينة
2.61	195.84	BA-Ep(T)40%
6.76	233.46	BA_Ep(T)40%_S(14)0.5%
8.84	189.67	BA_Ep(T)40%_S(14)1%
4.88	180.69	BA_Ep(T)40%_S(14)3%
4.02	173.81	BA_Ep(T)40%_S(14)4%
3.10	159.10	BA_Ep(T)40%_S(14)6%
6.18	203.67	BA_Ep(T)40%_S(400)0.5%
6.27	221.53	BA_Ep(T)40%_S(400)1%
3.99	191.67	BA_Ep(T)40%_S(400)3%
5.43	188.22	BA_Ep(T)40%_S(400)4%
4.22	168.55	BA_Ep(T)40%_S(400)6%

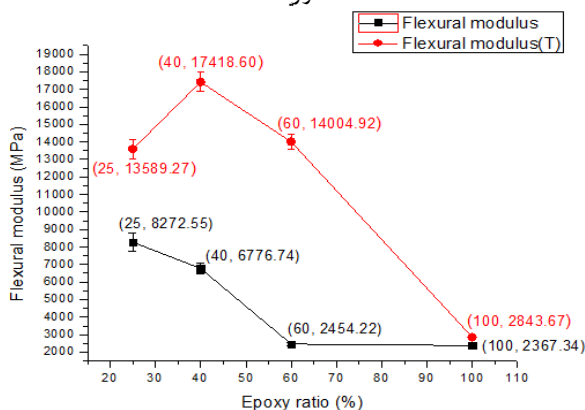
يُلاحظ الاتجاه العام في ازدياد مقاومة الصدم عند النسب المنخفضة للسيليكا النانوية حتى 0.5% والميكروية حتى 1% لتتخفف بعد ذلك. ويمكن تفسير هذا الانخفاض تبعاً للعاملين A و B المذكورين سابقاً. يُلاحظ أن أقل قيمة مقاومة صدم تعود للمادة المركبة BA\_Ep40%\_S(14)6%، ويُعزى ذلك إلى الارتفاع الكبير في لزوجة الإيبوكسي مع السيليكا النانوية 6% S(14)Ep، نتيجة إضافة كمية كبيرة من السيليكا النانوية التي ترفع لزوجة الإيبوكسي بشكل أكبر مما تفعله السيليكا الميكروية، وهذا ما يُعيق عملية إشباع الألياف وتغليفها بالإيبوكسي بشكل جيد.

### 3.2. اختبار الانعطاف:

#### 3.2.1. نتائج اختبار الانعطاف لعينات مواد مركبة بازلت-إيبوكسي.

يُمثل الشكل (1) منحنى نتائج معامل الانعطاف  $E_{bending}$  بدلالة نسبة الإيبوكسي لعينات مواد مركبة ألياف بازلت-إيبوكسي مع وبدون معالجة حرارية.

شكل (1): معامل الانعطاف لعينات مواد مركبة ألياف بازلت-إيبوكسي مع وبدون معالجة حرارية



من الواضح أن المعالجة الحرارية تلعب دوراً كبيراً في تحسين الخواص الميكانيكية للمادة المركبة حيث ازداد معامل الانعطاف للمادة المركبة BA-Ep40% من 6776.74 MPa إلى 17418.60 MPa. أما زيادة نسبة الإيبوكسي، فقد أثرت سلباً على العينات غير المعالجة بالنسبة لمعامل الانعطاف، ويُفسر

حيث  $\delta_{max}$  الانحناء في منتصف المسافة L عند قيمة مقاومة الانعطاف.

### 3. النتائج والمناقشة

#### 3.1. اختبار الصدم:

يبين جدول (1) متوسطات نتائج اختبار الصدم والانحراف المعياري (SD) لعينات مواد مركبة بازلت-إيبوكسي بدلالة نسبة الإيبوكسي مع وبدون معالجة حرارية.

جدول (1): نتائج اختبار الصدم لعينات مواد مركبة ألياف بازلت-إيبوكسي

العينة	En(KJ/m <sup>2</sup> )	SD(KJ/m <sup>2</sup> )
BA-Ep25%	99.79	3.07
BA-Ep(T)25%	111.81	2.43
BA-Ep40%	156.27	4.43
BA-Ep(T)40%	195.84	2.61
BA-Ep60%	223.49	5.23
BA-Ep(T)60%	226.61	6.46

يُلاحظ ازدياد مقاومة الصدم طردياً مع ازدياد نسبة الإيبوكسي، كما يُلاحظ أن مقاومة الصدم تكون أكبر في حالة العينات الخاضعة لمعالجة حرارية عند النسبتين 25% و 40% إيبوكسي، وبقية على ما هي عليه تقريباً عند النسبة 60% إيبوكسي، وذلك لأن نسبة الإيبوكسي العالية تجعل سلوكه القصف مهيمناً بحيث لا تظهر مباشرةً وتناسباً آثار المعالجة الحرارية على مقاومة الصدم للمادة المركبة مع 60% إيبوكسي كما هو الحال عند نسب الإيبوكسي المنخفضة، حيث يهيمن حينها السلوك الميكانيكي للألياف التي توفر التقوية الميكانيكية. يُستنتج مما سبق أن عملية المعالجة الحرارية للعينات حسنت مقاومة الصدم حيث أن الحرارة حسنت من تصالب المادة الرابطة والتصاقها بألياف البازلت، لذلك جرى تطبيق المعالجة الحرارية على جميع العينات المحضرة بعد ذلك. يبين جدول (2) متوسطات نتائج مقاومة الصدم لعينات مواد مركبة إيبوكسي-سيليكاً 14nm وإيبوكسي-سيليكاً 400nm على الترتيب بدلالة نسبة السيليكا. خضعت جميع هذه العينات لمعالجة حرارية عند الدرجة 60 °C مئوية لمدة خمس ساعات.

جدول (2): نتائج مقاومة الصدم لعينات مادة مركبة إيبوكسي-سيليكاً

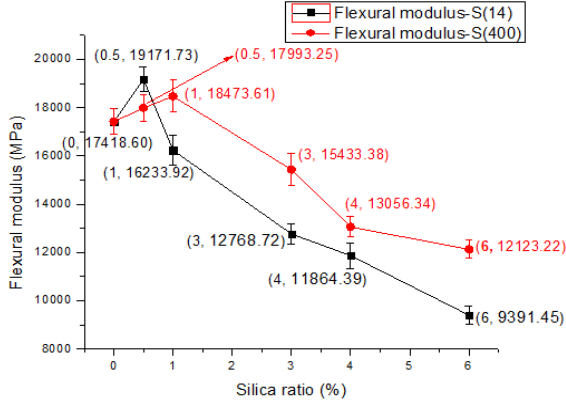
العينة	En(KJ/m <sup>2</sup> )	SD(KJ/m <sup>2</sup> )
Ep	27.02	1.84
Ep_S(14)0.5%	36.37	2.86
Ep_S(14)1%	25.84	1.66
Ep_S(14)3%	21.67	1.28
Ep_S(14)4%	19.47	1.34
Ep_S(14)6%	16.59	1.42
Ep_S(400)0.5%	31.22	1.01
Ep_S(400)1%	33.87	0.97
Ep_S(400)3%	24.31	1.36
Ep_S(400)4%	20.53	0.90
Ep_S(400)6%	18.27	0.72

يُلاحظ أن السيليكا النانوية 14 nm تحسن مقاومة الصدم عند إضافتها بنسب وزنية منخفضة مثل 0.5% ولكنها تخفف مقاومة الصدم بشكل كبير مع زيادة نسبتها في الإيبوكسي، بينما تحسن السيليكا الميكروية 400 nm مقاومة الصدم للإيبوكسي بإضافتها حتى نسبة 1% ثم تنخفض مقاومة الصدم. يُلاحظ أن إضافة السيليكا النانوية بنسبة 0.5% يعطي أعلى مقاومة صدم. يمكن تفسير ارتفاع قيمة مقاومة الصدم عند النسب المنخفضة للسيليكا النانوية والميكروية بانتقال موجة الصدمة عبر السطح البيني سيليكاً-إيبوكسي أي أن السيليكا تتحمل جزءاً من الصدمة التي تتلقاها المادة المركبة إيبوكسي-سيليكاً. بينما تنخفض مقاومة الصدم بزيادة كمية السيليكا بنوعها للأسباب والعوامل التالية:

• احتمال تأثير زيادة كمية السيليكا على درجة التصالب (Cross-linking) بين الإيبوكسي والمقسي نتيجة ارتفاع لزوجة الإيبوكسي بشكل كبير عند إضافة السيليكا غير المعدلة سطحياً (Preghenella et al., 2005).

يمثل الشكل (4) منحنى معامل الانعطاف  $E_{bending}$  لعينات مواد مركبة بازلت\_إيبوكسي سيليكاً (14nm) وبازلت\_إيبوكسي 40% سيليكاً (400nm) بدلالة نسبة السيليكا 14nm و 400nm.

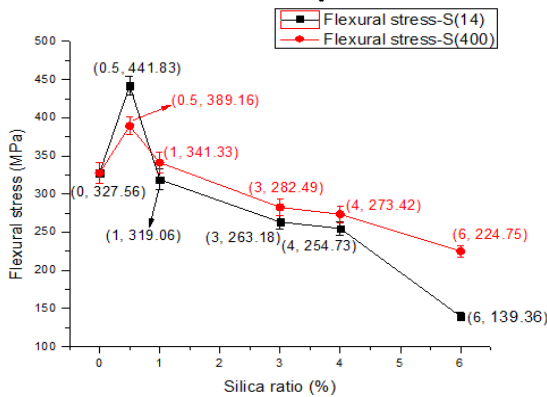
شكل (4) معامل الانعطاف  $E_{bending}$  بدلالة نسبة السيليكا ونوعها للمادة المركبة إيبوكسي 40% ألياف بازلت



يُلاحظ التأثير السلبي لإضافة السيليكا النانوية بنسب تتجاوز 0.5% والسيليكا الميكروية بنسب تتجاوز 1% على معامل الانعطاف للمواد المركبة الداخلة فيها. ويمكن تفسير ذلك تبعاً للعاملين A و B المذكورين سابقاً. بينما تحسن السيليكا النانوية المضافة بنسبة 0.5% معامل انعطاف المادة المركبة من 17418.60 MPa إلى 19171.73 MPa يُعزى ذلك إلى إمكانية تشتيت وتبلل كميات قليلة من السيليكا النانوية بالإيبوكسي وبالتالي تساهم هذه السيليكا النانوية بتحمل جزء من الإجهاد المطبق عبر السطح البيئي وتحسن الخواص الميكانيكية. يُسجل انخفاض واضح في قيمة معامل الانعطاف عند نسب تحميل بالسيليكا 6%، ويُعزى ذلك إلى الارتفاع الكبير في لزوجة الإيبوكسي (6% Ep/S)، نتيجة إضافة كمية كبيرة من السيليكا، وهذا ما يعيق عملية إشباع الألياف، أي أن الألياف لا تكون مغلفة بالإيبوكسي بشكل جيد.

يمثل الشكل (5) منحنى مقاومة الانعطاف  $\sigma_f$  لعينات مواد مركبة بازلت\_إيبوكسي سيليكاً (14nm) وبازلت\_إيبوكسي 40% سيليكاً (400nm) بدلالة نسبة السيليكا 14nm و 400nm.

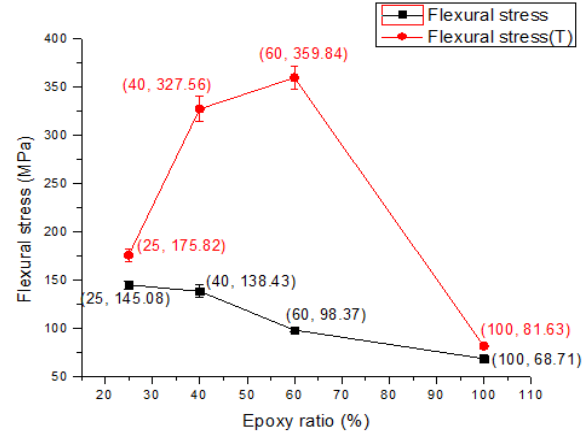
شكل (5): مقاومة الانعطاف  $\sigma_f$  بدلالة نسبة السيليكا ونوعها للمادة المركبة إيبوكسي 40% ألياف بازلت



يُسجل وجود تشابه نسبي بين سلوك مقاومة الانعطاف وسلوك معامل الانعطاف في هذه المواد المركبة، وهذا منطقي لأن المادة التي تمتلك معامل انعطاف كبير غالباً ما تتحمل إجهادات كبيرة أيضاً، لذلك يكون تفسير النتائج متشابهاً أيضاً عدا نسبة التحميل 1% سيليكاً ميكروية حيث انخفضت قيمة مقاومة الانعطاف قليلاً عما كان عليه عند نسبة التحميل 0.5% سيليكاً ميكروية. يمثل الشكل (6) نتائج التشوه عند الكسر  $\epsilon_f$  بدلالة نسبة السيليكا 14nm و 400nm.

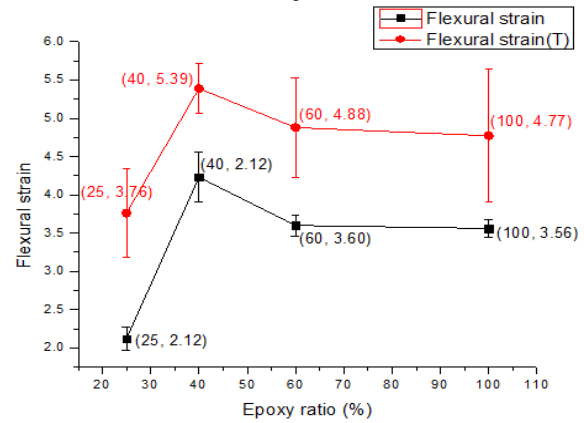
ذلك بازدياد كمية الإيبوكسي الذي يتمتع بمعامل مرونة منخفض نسبياً، خصوصاً إذا لم تتم معالجته حرارياً. يمثل الشكل (2) منحنى مقاومة الانعطاف  $\sigma_f$  بدلالة نسبة الإيبوكسي لعينات مواد مركبة ألياف بازلت\_إيبوكسي مع وبدون معالجة.

شكل (2): مقاومة الانعطاف لعينات مواد مركبة ألياف بازلت\_إيبوكسي مع وبدون معالجة حرارية



تلعب المعالجة الحرارية دوراً كبيراً في تحسين الخواص الميكانيكية للمادة المركبة حيث ازدادت مقاومة الانعطاف عند نفس نسبة الإيبوكسي ضمن المادة المركبة من 98.37 MPa إلى 359.84 MPa لعينة BA- Ep60%. أما زيادة نسبة الإيبوكسي، فقد أثرت سلباً على مقاومة الانعطاف للعينات غير المعالجة حرارياً، ويُفسر ذلك بازدياد كمية الإيبوكسي الذي يتمتع بمقاومة انعطاف منخفضة نسبياً، خصوصاً إذا لم تتم معالجته حرارياً. يمثل الشكل (3) منحنى التشوه عند الكسر  $\epsilon_f$  بدلالة نسبة الإيبوكسي لعينات مواد مركبة ألياف بازلت\_إيبوكسي مع وبدون معالجة حرارية.

شكل (3): التشوه عند الكسر لعينات مواد مركبة ألياف بازلت\_إيبوكسي مع وبدون معالجة حرارية



يُلاحظ أن أكبر قيمة للتشوه عند الكسر تكون للمادة المركبة المعالجة حرارياً BA- Ep(40%) بناءً على ما سبق، تكون نسبة الإيبوكسي المثلى مع ألياف البازلت من حيث معظم الخواص الميكانيكية والكلفة الاقتصادية كون المادة الرابطة مرتفعة الثمن هي 40% وزناً.

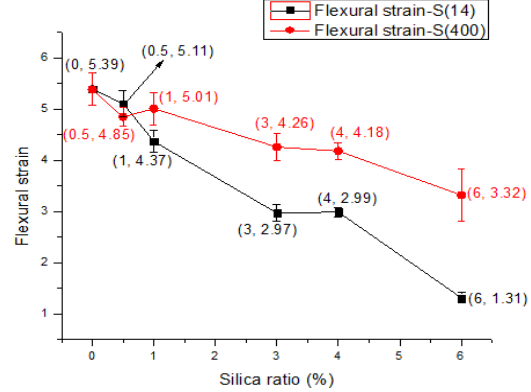
تبين نتائج اختبار الصدم والانعطاف اختلاف تأثير المعالجة الحرارية للمادة المركبة عليهما عند نسبة الإيبوكسي العالية، 60%. يعود ذلك إلى اختلاف حقل الإجهادات في منطقة الأنهيبار، وآلية الفشل في الاختبارين، وهيمنة سلوك المكون ذي النسبة الأعلى في تركيب المادة المركبة. إضافة إلى ذلك، يعد اختبار الصدم من الاختبارات الديناميكية عالية سرعة التشوه، في حين ينتمي اختبار الانعطاف إلى الاختبارات الاستاتيكية منخفضة سرعة التشوه.

د. جبره دكتوراه من جامعة Montpellier الفرنسية باختصاص علوم وهندسة المواد، باحث رئيسي في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، أعماله متوفرة باللغتين العربية والإنكليزية، نشر مع بعض أكبر دور النشر عالمياً (Elsevier, Wiley-Blackwell)، نشر أوراقاً علمية عديدة في سكوبس، ترجم كتابين مهمين بعنوان ميكانيك المواد المركبة لصالح مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية السعودية-المنظمة العربية للتقدم العلمي- المنظمة العربية للترجمة، عمل في مختلف مجالات هندسة المواد مثل المواد الزجاجية والسيراميكية والبوليميرات والمواد المركبة والمواد النانوية.

## المراجع

- Ciprari, D., Jacob, K. and Tannenbaum, R. (2006). Characterization of polymer nanocomposite interphase and its impact on mechanical properties. *Macromolecules*, 39(19), 6565–73 DOI: 10.1021/ma0602270
- Clyne, T.W. and Hull, D. (2019). *An Introduction to Composite Materials*. UK: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781139050586
- Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K.Y., Park, S. J. and Hui, D. (2015). A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 73(n/a), 166–80. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011
- Dorigato, A. and Pegoretti, A. (2012). Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates. *Journal of Composite Materials*, 46(15), 1773–85. DOI: 10.1177/0021998311425620
- Gibson, R.F. (2010). A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. *Composite structures*, 92(12), 2793–810. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.05.003
- Ibrahim, M.B., Habib, H.Y. and Jabrah, R.M., (2020). Preparation of Kevlar-49 fabric/E-glass fabric/epoxy composite materials and characterization of their mechanical properties. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés-Journal of Composite and Advanced Materials*, 30(3-4), 133–41. DOI: 10.18280/rcma.303-403
- Jones, R.M. (1998). *Mechanics of Composite Materials*. Florida, US: CRC press.
- Kuzmin, K.L., Timoshkin, I.A., Gutnikov, S.I., Zhukovskaya, E.S., Lipatov, Y.V. and Lazoryak, B.I. (2017). Effect of silane/nano-silica on the mechanical properties of basalt fiber reinforced epoxy composites. *Composite Interfaces*, 24(1), 13–34. DOI: 10.1080/09276440.2016.1182408
- Liu, Q., Shaw, M.T., Parnas, R.S. and McDonnell, A.M. (2006). Investigation of basalt fiber composite mechanical properties for applications in transportation. *Polymer Composites*, 27(1), 41–8. DOI: 10.1002/pc.20162
- Matykievicz, D. (2020). Hybrid Epoxy Composites with Both Powder and Fiber Filler: A Review of Mechanical and Thermomechanical Properties. *Materials*, 13(8), 1802. DOI: 10.3390/ma13081802
- Preghenella, M., Pegoretti, A. and Migliaresi, C. (2005). Thermo-mechanical characterization of fumed silica-epoxy nanocomposites. *Polymer*, 46(26), 12065–72. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.10.098
- Rahman, I. A. and Padavettan, V. (2012). Synthesis of silica nanoparticles by sol-gel: size-dependent properties, surface modification, and applications in silica-polymer nanocomposites: A review. *Journal of Nanomaterials*, 2012(n/a), 1–15. DOI: 10.1155/2012/132424
- Routray, S., KC, B. and Barik, M.R., (2015). Effect of fiber orientation on the mechanical properties of fabricated plate using basalt fiber. *Research Journal of Recent Sciences*, 4(1SC-2014), 202–8.
- Spagnuolo, D.M., Napadensky, E., Sano, T. and Wolbert, J.P. (2011). Investigation of basalt woven fabrics for military applications. *US Army Research Laboratory*, n/a(n/a), 1-20.

شكل (6) التشوه عند الكسر  $\epsilon_f$  بدلالة نسبة السيليكا 14nm و 400nm و 400nm



يُلاحظ أن تأثير إضافة السيليكا على التشوه عند الكسر سلبى عند كل نسب التحميل بنوعي السيليكا، يُفسر ذلك بأن السيليكا رفعت جساءة المادة المركبة عند إضافتها بكمية قليلة ويؤكد ذلك تحسن قيم معامل الانعطاف ومقاومة الانعطاف عند نسب التحميل المنخفضة لذلك تنخفض لدونة المادة وتنخفض قابليتها للتشوه. كما انخفض التشوه عند الكسر مع زيادة نسبة السيليكا لتبلغ أدنى قيمها عند نسب تحميل 6% سيليكا نانوية.

## 4. الاستنتاجات

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن النسبة المثلى لإشباع نسيج ألياف البازلت بالإيبوكسي المُستعمل تبلغ 40% من وزن المادة المركبة، كما وضحت أهمية المعالجة الحرارية في تحسين الخواص الميكانيكية للمواد المركبة كونها تحسن تصالب المادة الرابطة. وقد تبينت إمكانية استخدام السيليكا النانوية بنسبة مثلى تبلغ 0.5% وزناً والسيليكا الميكروية بنسبة مثلى 1% وزناً لتحسين الخواص الميكانيكية من خلال إضافتها للمادة الرابطة قبل إشباع الألياف مما يوسع آفاق استخدامات المواد المركبة القائمة على أساس ألياف البازلت والإيبوكسي.

## نبذة عن المؤلفين

محمد بركات إبراهيم

قسم الفيزياء التطبيقية، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق، سوريا، mohammad.ibrahim@hiast.edu.sy، 00963937488228

م. ابراهيم درجة إجازة في الهندسة باختصاص علوم وهندسة المواد من المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، تخرج بترتيب الأول على فرعه في المعهد العالي، نشر ورقة بحثية في مجلة تابعة لدار نشر Lavoisier الفرنسية، عمل في مجال البوليميرات والمواد المركبة والمواد النانوية. رقم الأوركيد (ORCID):

0000-0002-1503-7725

حسين يوسف حبيب

قسم الفيزياء التطبيقية، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق، سوريا، hussein.habib@hiast.edu.sy، 00963995563715

ما. حبيب درجة ماجستير باختصاص علوم وتكنولوجيا البوليميرات من المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، نشر ورقتين بحثيتين في مجلة تابعة لدار نشر Lavoisier الفرنسية ومجلة جامعة دمشق، عمل في مجال البوليميرات والطلاءات واللواصق والمواد المركبة والمواد النانوية.

رفيع موسى جبره

قسم الفيزياء التطبيقية، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق، سوريا، jabrah.rafi@hiast.edu.sy، 00963116316172