الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة التصميم الميكإنيكي

تطوير أداء جناح طائرة صغيرة مصنوع من الستيريوبور المدعم بالمواد المركبة البولميرية

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في علم المواد وهندستها

إعداد:

م. حسام علي

إشراف:

د.م. وسيم ديب

مدرس في جامعة دمشق

2024

موافقة لجنة الحكم

الشكر والتقدير

أتوجه بالشكر الكبير بعد الانتهاء من اعداد هذا البحث إلى جميع العاملين في قسم التصميم الميكانيكي في كلية الهندسة الميكانيكية في جامعة دمشق الذين لم يبخلوا بتقديم أية مساعدة خلال فترة وجودي معهم.

كما أتوجه بجزيل الشكر إلى من أعطاني فرصة البحث العلمي:

السيد الدكتور ابراهيم الحكيم.

ولا أنسى أبدا بامتناني لزملاء العمل وما قدموه لي الاساتذه:

شعبان ومحمد وبديع وأيمن ووسام.

كل الشكر لزملائي في ورشة المواد المركبة:

منهل وجعفر ومصطفى وماهر وابراهيم.

وتعجز كلمات الشكر أمام مشرفي على هذا البحث الذي ساندني بكل تفصيل كبير أو صغير خلال مسيرتي معه.

الدكتور وسيم ديب

وأخيرا أتوجه بالشكر إلى إدارة المعهد العالي للعلوم والدراسات التكنولوجية وأخص بالذكر الدكتور الفاضل رفيع جبرة والاستاذ الفاضل برهان غزالة مشرف مخبر الاختبارت الميكانيكية

الإهداء

إلى من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة.

إلى الذي لم يبخل علي بأي شيئ وسعى لأجل راحتي ونجاحي.

إلى أعظم وأعز رجل في الكون ..... أبي العزيز.

إلى من ساندتني في دعائها وسهرت الليالي تنير دربي.

إلى نبع العظمة والحنان وأجمل ابتسامة في حياتي.

إلى أروع إمرأة في الوجود.....أمي الغالية.

إلى الذين بعثهم الله لي هدية على هيئة إخوه وعرفوا معنى الأخوة ..... إخوتي وأخواتي الأحباء.

إلى المشرف الفاضل الذي لم يبخل علي بالنصح والإرشاد.

إلى من شاركني وساعدني في عملي ودراستي زملائي وأصدقائي.

فهرس المحتويات

موافقة لجنة الحكم i

الشكر والتقدير ii

الإهداء iii

فهرس المحتويات iv

فهرس الجداول ix

فهرس الأشكال التوضيحية xii

قائمة المصطلحات والاختصارات باللغتين العربية والإنكليزية xviii

قائمة الرموز xx

المستخلص xxii

الفصل الأول: الإطار العام للبحث ١

1-1 المقدمة (introduction): ١

١-٢ الإشكالية البحثية (Research Problem): ١

١-٣ تساؤلات البحث ٢

١-٤ فرضيات البحث (Research hypotheses): ٢

١-٥ هدف البحث (Research Objective): ٢

١-٦ أهمية البحث (Research Importance): ٣

١-٧ حدود الدراسة (Study limits): ٣

١-٨ منهج البحث، وأدواته (Research Methodology): ٤

١-٩ مكونات البحث : (Research components): ٤

الفصل الثاني: المواد المركبة ذات الأساس البوليميري ٦

٢-١ تمهيد (Preface): ٦

٢-٨ المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية ومكوناتها ١٢

٢-٨-١ المادة الرابطة (Matrix) ١٢

٢-١٠ أنواع الألياف ١٨

٢-١٠-١ ألياف الأراميد (kevlar) ١٨

٢-١٠-٢ ألياف البور ١٩

٢-١٠-٣ ألياف البازلت ١٩

٢-١٠-٤ ألياف البولي إيثلين ٢٠
٢-١٠-٥ الألياف الزجاجية ٢٠
٢-١٠-٦ ألياف الكربون ٢١
٢-١١- الخطوات الأساسية لتصنيع المواد المركبة ٢٤
٢-١٢ طرق تصنيع المواد المركبة ٢٥
٢-١٢-١ طريقة القالب المفتوح (Open Contact Moudling) ٢٥
٢-١٢-٢ طريقة القولبة بإنتقال الريزين RTM (Resin Moldling Transfer) ٢٦
٢-١٢-٣ القولبة بالضغط (Compression molding) ٢٧
٢-١٢-٤ طريقة القولبة بالسحب(Pultrusion method) ٢٨
٢-١٢-٥ طريقة اللف الآلي (لف الألياف Filament winding)..... ٢٩
٢-١٢-٦ طريقة التشكيل باللف (Filament Winding Process):..... ٣٠
٢-١٣ اختيار عملية التصنيع المناسبة..... ٣٠
٢-١٦ طريقة العناصر المنتهية ٣١
٢-١٦-١ خطوات تطبيق طريقة العناصر المنتهية..... ٣٢
٢-١٦-٢ برنامج العناصر المنتهية Ansys..... ٣٤
٢-١٧ السلوك الميكانيكي للمولد المركبة ٣٤
٢-١٨ معايير الإنهيار (Failure Criteria)..... ٤٠
٢-١٨-١ معيار الإجهاد الأعظمي (**Maximum stress failure Criterion**) ٤١
٢-١٨-٢ معيار التشوه الأعظمي (Maximum Strain Failure Criterion)..... ٤١
٢-١٨-٣ معيار تساي-هيل (Tsai-Hill Failure Criterion) ٤٢
الفصل الثالث: الستيريوبور والهياكل المركبة..... ٤٥
٣-١- تمهيد (Preface) :..... ٤٥
٣-2 مقدمة..... ٤٥
٣-٢ أهمية الـ EPS ٤٦
٣-٣ تصنيع الـ EPS ٤٧
٣-٤ اختبارات الEPS..... ٥٠
٣-٥ الخصائص الفيزيائية والكيميائية للستريوبور ٥٠
٣-٥-١ كثافة الـ EPS ٥٠
٣-٥-٢ تأثير درجات الحرارة EPS..... ٥١

٣-٥-٣ تأثير الحريق على EPS ٥٢
٣-٥-٤ تأثير الماء على EPS ٥٢
٣-٦ الخصائص الميكانيكية للبولستيرين الموسع ٥٣
٣-٦-١ تأثير الضغط على EPS ٥٣
٣-٦-٢ تأثير الانحناءعلىEPS ٥٤
٣-٦-٣ تأثير الزحف علىEPS ٥٥
٣-٦-٤ نسبة بواسون لل EPS ٥٧
٣-٦-٥ المقاومة الكيميائية لل EPS..... ٥٨
٣-٧ الهياكل المركبة ٥٩
٣-٨ أهمية الهياكل المركبة ٦٠
الفصل الرابع : الدراسات المرجعية ٦١
الفصل الخامس: الإطار العملي للبحث ٧٨
٥-١ تمهيد (PREFACE): ٧٨
٥-٢ المواد المستخدمة..... ٧٨
٥-٢-١ الألياف: ٧٨
٥-٢-٢ المادة الرابطة ٧٩
٥-٢-٣ البولستيرين الموسع (EPS): ٨٠
٤-٣ أدوات التحضير ٨٠
٤-٥ تحضير عينات المواد المركبة: ٨٢
٤-٥-١ تحضير عينات اختبار الشد: ٨٢
٤-٥-٢ تحضير عينات اختبار الانحناء: ٨٤
٤-٦ توصيف العينات المستخدمة في الاختبارات لهذا البحث ٨٦
٤-٦-١ عينات اختبار الشد:..... ٨٦
٤-٦-٢ عينات اختبار الانحناء ٩٠
٤-٦-٣ عينات اختبار الإيبوكسي ٩٢
٥-٦ توصيف عينات قياس الكثافة والمسامية ٩٣
٦-٦ آلة الاختبار:..... ٩٤
٦-٦-١ اختبار الشد..... ٩٥
٦-٦-٢ اختبار الانحناء ثلاثي النقاط ٩٦

٦-٧ الكثافة التجريبية والنظرية لمادة مركبة ومساميتها..... ٩٦
٦-٨ النمذجة العددية للاختبارات السابقة..... ٩٧
٦-٨-١ مقدمة ٩٧
٦-٨-٢ خطوات العمل على برنامج ال Ansys:..... ٩٨
الفصل السادس: النتائج والمناقشة..... ١٠٨
٦-١ تمهيد (PREFACE) ١٠٨
٦-٢ نتائج اختبار الشد ١٠٨
٦-٢-١ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي-كربون (C) ١٠٨
٦-٢-٢ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي-زجاج (G) ١٠٩
٦-٢-٣ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي-كيفلر (K) ١١١
٦-٢-٤ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي-هجين (W) ١١٢
٦-٢-٥ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي-هجين (W) ١١٤
٦-٣ نتائج اختبار الانحناء..... ١١٥
٦-٣-١ نتائج اختبار الانحناء لعينات الستريوبور المدعم بصفائح إيبوكسي-كربون (B-C) ١١٥
٦-٣-٢ نتائج اختبار الانحناء لعينات الستريوبور المدعم بصفائح إيبوكسي-زجاج (B-G)..... ١١٦
٦-٣-٣ نتائج اختبار الانحناء لعينات الستريوبور المدعم بصفائح إيبوكسي-كيفلر (B-K)..... ١١٧
٦-٣-٤ نتائج اختبار الانحناء لعينات الستريوبور المدعم بصفائح إيبوكسي-هجين (B-W)..... ١١٨
٦-٣-٥ اختبارالانحناء على الستريوبور ١١٩
٦-٤ نتائج النمذجة العددية على برنامج ANSYS ١٢٠
٦-٤-١ نتائج النمذجة لاختبار الشد ١٢٠
٦-٤-٢ نمذجة اختبار الانحناء على برنامج الـ Ansys..... ١٢١
٦-٤-٣ المنحنيات الناتجة عن النمذجة في الانحناء ١٢٣
٦-٤-٤ الإجهاد الناتج عن نمذجة اختبار الانحناء للعينات ١٢٥
٦-٥ دراسة الإنهيار لطبقات المواد المركبة في اختبار الانحناء على برنامج ANSYS ١٢٨
٦-٥-١ الإنهيار حسب معيار Tsi-Wu ١٢٨
٦-٥-٢ الإنهيار حسب معيار الإجهاد الاعظمي ١٣٠
٦-٥-٣ دراسة الإنهيار عند تطبيق إزاحة بمقدار (15mm)..... ١٣٠

٦-٥-٤ دراسة الإنهيار عند تطبيق إزاحة بمقدار (30mm)..... ١٣١
٦-٦ نتائج الكثافة التجريبية والكثافة النظرية والمسامية لصفائح المواد المركبة ١٣٣
الفصل السابع: الاستنتاجات والتوصيات.....١٣٧
٧-١ الاستنتاجات ١٣٧
٧-١-١ اختبار الشد..... ١٣٧
٧-١-٢ اختبار الانحناء ١٣٨
٧-١-٣ الانهيار..... ١٤٠
٧-١-٤ الكثافة والمسامية ١٤٠
٧-٢ التوصيات ١٤٠
المراجع.....١٤٣
المراجع الأجنبية ١٤٣
المراجع العربية ١٤٧

فهرس الجداول

الجدول رقم (١,٢): درجات حرارة الاستخدام العظمى لأهم المواد البلاستيكية المستخدمة كمواد رابطة..... ١٣
الجدول رقم (٢,٢): خواص بعض مواد البلاستيك المتصلب حراريا..... ١٤
الجدول رقم (٣,٢): خواص بعض مواد البلاستيك الحراري..... ١٦
الجدول رقم (٤,٢): خواص الألياف.....١٧
الجدول رقم (٥,٢): الخصائص الميكانيكية لألياف الاراميد والبور والبازلت.....١٩
الجدول رقم (٦,٢): الخواص الميكانيكية لأنواع من ألياف الزجاج.....٢١
الجدول رقم (٧,٢) الخصائص الميكانيكية لألياف الكربون.....٢٣
الجدول رقم (١,٣): كثافات لبعض مواد العزل والتغليف.....٥١
الجدول رقم (٢,٣): الخواص الميكانيكية الناتجة عن الانحناء لكثافات مختلفة من الستريوبور..... ٥٥
الجدول رقم (٣,٣) قيم نسب بواسون ل EPS..... ٥٧
الجدول رقم (٤,٣): المقاومة الكيميائية لل EPS لبعض المحاليل والكواشف والمذيبات الشائعة.....٥٨
الجدول رقم (١,٤): انماط مختلفة التركيب من مركبات الفلين والمركب البوليميري..... ٦٣
الجدول رقم(٢,٤): الخواص الميكانيكية للعينات الناتجة عن المحاكاة ٦٨
الجدول رقم (٣,٤): العينات المدروسة بنسبها المختلفة من المواد..... ٦٩
الجدول رقم (٤,٤): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الشد..... ٧٠
الجدول رقم (١,٥): خصائص ومواصفات الألياف المستخدمة..... ٧٨
الجدول رقم (٢,٥): خصائص ومواصفات الألياف المستخدمة..... ٧٩
الجدول رقم (٣,٥): خصائص ومواصفات الستريوبور المستخدمة..... ٨٠
الجدول رقم (٤,٥) يوضح أبعاد عينات الكربون..... ٨٧
الجدول رقم (٥,٥) يوضح أبعاد عينات الزجاج..... ٨٨
الجدول رقم (٦,٥) يوضح أبعاد عينات الكيفلر..... ٨٨
الجدول رقم (٧,٥) يوضح أبعاد عينات الكيفلر..... ٨٩
الجدول رقم (٨,٥): يوضح أبعاد عينات إنحناء الكربون..... ٩٠
الجدول رقم (٩,٥) يوضح أبعاد عينات إنحناء الزجاج..... ٩١

الجدول رقم (١٠,٥): يوضح أبعاد عينات إنحناء الكيفلر.....٩١
الجدول رقم (١١,٥): يوضح أبعاد عينات إنحناء الهجين ٩٢
الجدول رقم (١٢,٥): أبعاد عينات قياس الكثافة والمسامية..... ٩٣
الجدول رقم (١٣,٥) الخواص التقريبية لصفيحة المواد المركبة ذات الألياف الكربونية..... ١٠٠
الجدول رقم (١,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الكربون..... ١٠٩
الجدول رقم (٢,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الزجاج..... ١١٠
الجدول رقم (٣,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الكيفلر..... ١١٢
الجدول رقم (٤,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الهجين..... ١١٣
الجدول رقم (٤,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الإيبوكسي..... ١١٤
الجدول رقم (٥,٦): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الانحناء للعينات B–C ١١٦
الجدول رقم (٦,٦): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الانحناء للعينات B–G ١١٧
الجدول رقم (٧,٦): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الانحناء للعينات B–K ١١٨
الجدول رقم (٨,٦): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الانحناء للعينات B–W ١١٩
الجدول رقم (٩,٦) الخواص الميكانيكية الناتجة عن المحاكاة للعينات ١٢٠
الجدول رقم (١٠,٦): الخواص الميكانيكية للإنحناء للستريوبور ١٢٢
الجدول رقم (١١,٦): الاستطالة الكلية للإنحناء للعينات الاربعة..... ١٢٣
الجدول رقم (١٢,٦): قيم الإجهادات الناتجة عن الانحناء لكل طبقة للعينات..... ١٢٨
الجدول رقم (١٣,٦): عامل الإنهيار لطبقة المواد المركبة للعينات..... ١٢٩
الجدول رقم (١٤,٦): قيم معامل الإنهيار للعينات حسب معيار الإجهاد الأعظمي..... ..... ١٣٠
الجدول رقم (١٥,٦): قيم معامل الإنهيار للعينات للطبقة العلوية عند تطبيق إزاحة 15mm ١٣١
الجدول رقم (١٦,٦): قيم معامل الإنهيار للعينات للطبقة العلوية عند تطبيق إزاحة 15mm..... ١٣٢
الجدول رقم (١٧,٦): قيم الكثافة التجريبية والنظرية والمسامية لصفيحة الكربون..... ١٣٣
الجدول رقم (١٨,٦): قيم معامل الكثافة التجريبية والنظرية والمسامية لصفيحة الزجاج..... ١٣٤
الجدول رقم (١٩,٦): قيم معامل الكثافة التجريبية والنظرية والمسامية لصفيحة الكيفلر..... ١٣٤
الجدول رقم (٢٠,٦): قيم معامل الكثافة التجريبية والنظرية والمسامية لصفيحة الهجين..... ١٣٥

الجدول رقم (١,٧): الخواص الميكانيكية التجريبية والعددية..... ١٣٧
الجدول رقم (٢,٧): قيم الاستطالة التجريبية والاستطالة العددية عند الحمولات العظمى..... ١٣٨
الجدول رقم (٣,٧): قيم الاستطالة التجريبية والعددية وقيم الإجهاد لعينات الانحناء..... ١٣٩

فهرس الأشكال التوضيحية

الشكل رقم (١,٢): بنية مادة الخشب..... ٧
الشكل رقم (٢,٢): تشييد المبإني في الحضارة المصرية القديمة.....٧
الشكل رقم (٣,٢): هيكل طائرة وقارب من مادة مركبة مقواة بألياف الزجاج..... ٨
الشكل رقم (٤,٢): مقطع مكبر لمادة مركبة من ألياف الكربون– الإيبوكسي..... ٩
الشكل رقم (٥,٢): تطور تصنيع هياكل الطائرات.....١٠
الشكل رقم (٦,٢): تصنيف المواد المركبة وفقاً لمادة التقوية..... ١١
الشكل رقم (٧,٢) سلاسل مواد البلاستيك الحراري.....١٥
الشكل رقم (٨,٢): يوضح بعض اشكال النسج.....١٨
الشكل رقم (٩,٢): أشكال توزع السلاسل في ألياف الكربون.....٢٢
الشكل رقم (١٠,٢): أشكال الألياف.....٢٣
الشكل رقم (١١,٢): طريقة القالب المفتوح..... ٢٥
الشكل رقم (١٢,٢): طريقة رش القالب بمسدس الرش..... ٢٦
الشكل رقم (١٣,٢): تطبيقات طريقة الرش بمسدس الرش.....٢٦
الشكل رقم (١٤,٢): طريقة الإنتقال بالريزين.....٢٧
الشكل رقم (١٥,٢): منتجات طريقة القولبة بإنتقال الريزين..... ٢٧
الشكل رقم (١٦,٢): طريقة القولبة بالضغط.....٢٨
الشكل رقم (١٧,٢): طريقة القولبة بالسحب.....٢٨
الشكل رقم (١٨,٢): بعض منتجات طريقة القولبة بالسحب.....٢٩
الشكل رقم (١٩,٢): طريقة اللف الآلي.....٢٩
الشكل رقم (٢٠,٢) طريقة التشكيل باللف.....٣٠
الشكل رقم(٢١,٢): نماذج عن العناصر المستخدمة في طريقة العناصر المنتهية.....٣٢
الشكل رقم (٢٢,٢): إنماط السلوك للمواد.....٣٣
الشكل رقم (٢٣,٢): عنصر حجمي خاضع للإجهادات الرئيسية.....٣٤
الشكل رقم (٢٤,٢): جمل الإحداثيات ٣٩

الشكل رقم (٢٥,٢): الإجهادات في طبقة الألياف..... ٤٠
الشكل رقم (٢٦,٢): الإجهادات في طبقة الألياف..... ٤١
الشكل رقم (١,٣): استخدام الفلين في البناء والعزل ٤٦
الشكل رقم (٢,٣): استخدام الستريوبور في الطائرة الاستطلاعية ٤٧
الشكل رقم (٣,٣): أشكال الستريوبور..... ٤٧
الشكل رقم (٤,٣): شكل تخطيطي الـ EPS ٤٨
الشكل رقم (٥,٣): مخطط صندوقي لإنتاج الستريوبور..... ٤٩
الشكل رقم (٦,٣) سلوك الإجهاد والانفعال لـ EPS لكثافات مختلفة تحت حمولات الضغط للعينات السابقة..... ٥٤
الشكل رقم (٧,٣): اختبار قوة الانحناء على الEPS ٥٥
الشكل رقم (٨,٣): سلوك زحف الEPS تحت مستويات الإجهاد المختلفة ٥٦
الشكل رقم (٩,٣): تأثير الكثافة على زحف الEPS ٥٧
الشكل رقم (١٠,٣): نموذج من هيكل مواد متراكبة ٥٩
الشكل رقم (١,٤): مقارنة لخواص الألياف المعرضة للشد..... ٦١
الشكل رقم (٢,٤): شكل الدعامات العرضية للجناح..... ٦٢
الشكل رقم (٣,٤): أشكال ممكنة الاستخدام للجناح في مثالنا..... ٦٢
الشكل رقم (٤,٤): الخواص الميكانيكية لمركبات البولمير/الفلين..... ٦٣
الشكل رقم (٥,٤): نتائج اختبار الشد..... ٦٥
الشكل رقم (٦,٤): منحنيات اجهاد الانحناء للعينات المدروسة..... ٦٥
الشكل رقم (٧,٤) خواص العينات المصنعة وفق التريب الوارد في الجدول المرافق..... ٦٦
الشكل رقم(٨,٤): واجهة برنامج المحاكاة المستخدم في الدراسة..... ٦٧
الشكل رقم (٩,٤): ادخال خواص كل طبقة وتشكيل الطبقات وفق البرنامج..... ٦٨
الشكل رقم (١٠,٤): المنحنيات الناتجة للعينات عن اختبار الشد..... ٧٠
الشكل رقم (١١,٤): نموذج الاختبار..... ٧١
الشكل رقم (١٢,٤): التاثر حول الثقب..... ٧٢
الشكل رقم (١٣,٤): الاختراق الناتج عن الصدم..... ٧٢

الشكل رقم (١٤,٤): العينات المصنعة..... ٧٣
الشكل رقم (١٥,٤): نتائج اختبار الشد للعينات..... ٧٤
الشكل رقم (١٦,٤): معامل الإنهيار للثقب حسب معيار تساي–هو..... ٧٤
الشكل رقم (١٧,٤): عينة الاختبار ٧٥
الشكل رقم (١٨,٤): شكل التشوه الحاصل عند تحميل عينة الاختبار..... ٧٦
الشكل رقم (١٩,٤): تمدد الشقوق الحاصلة مع اختلاف عدد ساعات العمل..... ٧٦
الشكل رقم (٢٠,٤): منحني العلاقة بين درجة الحرارة والتقدم في العمر..... ٧٧
الشكل رقم (١,٥): صمام إنبوب الشفط..... ٨١
لشكل رقم (٢,٥): ميزان الكتروني..... ٨١
الشكل رقم (٣,٥): الفراشاة الدوارة..... ٨١
الشكل رقم (٤,٥): عينة اختبار الشد وعملية التنضيد..... ٨٢
لشكل رقم (٥,٥): قص الألياف وتجهيزها..... ٨٣
الشكل رقم (٦,٥): عملية خلط المواد..... ٨٣
الشكل رقم (٧,٥): مد واشباع طبقات الألياف..... ٨٣
الشكل رقم (٨,٥) وضع طبقة الساتان..... ٨٣
الشكل رقم (٩,٥): وضع طبقة نايلون مثقب..... ٨٣
الشكل رقم (١٠,٥): وضع طبقة اللباد ٨٤
الشكل رقم(١١,٥): وضع صمام الشفط..... ٨٤
الشكل رقم (١٢,٥): شفط عينات المواد المركبة..... ٨٤
الشكل رقم (١٣,٥): محدد القص..... ٨٥
الشكل رقم (١٤,٥): الة القص بالسلك..... ٨٥
الشكل رقم (١٥,٥): عينة الستريوبور..... ٨٥
الشكل رقم (١٦,٥): عينات الانحناء..... ٨٦
الشكل رقم (١٧,٥) تجهيز المحفظة البلاستيكية مع حلمات الشفط..... ٨٦
الشكل رقم (١٨,٥): مخطط عينات اختبار الشد..... ٨٧

الشكل رقم (١٩,٥): عينات شد الكربون..... ٨٧
الشكل رقم (٢٠,٥): عينات شد الزجاج..... ٨٨
الشكل رقم (٢١,٥): عينات شد الكيفلر..... ٨٩
الشكل رقم (٢٢,٥) عينات شد الهجين..... ٩٠
الشكل رقم (٢٣,٥): عينات إنحناء الكربون..... ٩٠
الشكل رقم (٢٤,٥) عينات إنحناء الزجاج..... ٩١
الشكل رقم (٢٥,٥): عينات إنحناء الكيفلر..... ٩١
الشكل رقم (٢٦,٥): عينات إنحناء الهجين..... ٩٢
الشكل رقم (٢٧,٥): عينات شد الإيبوكسي..... ٩٢
الشكل رقم (٢٨,٥): عينات قياس الكثافة والمسامية..... ٩٣
الشكل رقم (٢٩,٥): جهاز الاختبارات العام..... ٩٥
الشكل رقم (٣٠,٥): اختبار الانحنار ثلاثي نقاط الارتكاز..... ٩٦
الشكل رقم (٣٠,٥): الخطوات المتسلسلة على البرنامج..... ٩٨
الشكل رقم (٣١,٥): الذي يظهر الشكل الخاص بعينة الانحناء..... ٩٩
الشكل رقم (٣٢,٥): واجهة المكتبة الهندسية..... ٩٩
الشكل رقم (٣٣,٥): سماكة الطبقة الواحدة ومادتها..... ١٠٢
الشكل رقم (٣٤,٥): المنحني القطبي لمعاملات يونغ ومعامل القص للمادة..... ١٠٢
الشكل رقم (٣٥,٥): جملة الإحداثيات الموضعية..... ١٠٣
الشكل رقم (٣٦,٥): Sets Selection..... ١٠٣
الشكل رقم (٣٧,٥): تحديد عدد الطبقات..... ١٠٤
الشكل رقم (٣٨,٥): تكوين الجسم الصلب..... ١٠٤
الشكل رقم (٣٩,٥): أنواع العناصر المنتهية..... ١٠٥
الشكل رقم (٤٠,٥): معايير إنهيار المواد المركبة في البرنامج..... ١٠٦
الشكل رقم (١,٦): مخطط انفعال–اجهاد لعينات الكربون..... ١٠٨
الشكل رقم (٢,٦): مخطط استطالة–حمولة لعينات الكربون..... ١٠٩

الشكل رقم (٣,٦): مخطط الانفعال–الاجهاد لعينات الزجاج..... ١١٠
الشكل رقم (٤,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الزجاج..... ١١٠
الشكل رقم (٥,٦): مخطط الانفعال–الاجهاد لعينات الكيفلر..... ١١١
الشكل رقم (٦,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الكيفلر..... ١١٢
الشكل رقم (٧,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الهجين..... ١١٣
الشكل رقم (٨,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الهجين..... ١١٣
الشكل رقم (٩,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الإيبوكسي..... ١١٥
الشكل رقم (٩,٦): مخطط الاستطالة مع الحمولة لاختبارالانحناء لعينات B–C ١١٥
الشكل رقم (١٠,٦): مخطط الاستطالة مع الحمولة لاختبارالانحناء لعينات B–G ١١٦
الشكل رقم (١١,٦): مخطط الاستطالة–الحمولة الناتج عن اختبار الانحناء لعينات B–K ١١٧
الشكل رقم (١٢,٦): مخطط الاستطالة–الحمولة لاختبار الانحناء لعينات B–W ١١٨
الشكل رقم(١٣,٦): اختبار الإنحناء للستريوبور..... ١١٩
الشكل رقم (١٤,٦): نمذجة الشد لعينة الكربون..... ١٢٠
الشكل رقم(١٥,٦): منحنيات العينات الأربعة ضمن مجال المرونة..... ١٢١
لشكل رقم (١٦,٦): الاستطالة الكلية للستريوبور..... ١٢٢
الشكل رقم (١٧,٦): الاجهادات الناتجة عن حمولة الانحناء للستريوبور..... ١٢٢
الشكل رقم (١٨,٦): الاستطالة الكلية لإنحناء عينة الكربون..... ١٢٣
الشكل رقم (١٩,٦): منحي الاستطالة–الحمولة للعينات المختبرة والناتج عن بيانات المحاكاة لعينة الكربون.... ١٢٤
الشكل رقم (٢٠,٦): منحي الاستطالة–الحمولة للعينات المختبرة والناتج عن بيانات المحاكاة لعينة الزجاج..... ١٢٤
الشكل رقم (٢١,٦): منحي الاستطالة–الحمولة للعينات المختبرة والناتج عن بيانات المحاكاة لعينة الكيفلر..... ١٢٥
الشكل رقم (٢٢,٦): منحني الاستطالة–الحمولة للعينات المختبرة والناتج عن بيانات المحاكاة لعينة الهجين.... ١٢٥
الشكل رقم (٢٣,٦): إجهاد كامل جسم العينة المدعمة بالكربون الناتج عن النمذجة..... ١٢٦
الشكل رقم (٢٤,٦): إجهاد الطبقة العلوية من جسم العينة المدعمة بالكربون الناتج عن النمذجة..... ١٢٦
الشكل رقم (٢٥,٦): إجهاد الطبقة السفلية من جسم العينة المدعمة بالكربون الناتج عن النمذجة..... ١٢٧
الشكل رقم (٢٦,٦): إجهاد الطبقة الوسطى من جسم العينة المدعمة بالكربون الناتج عن النمذجة..... ١٢٧

الشكل رقم (٢٧,٦): معامل الإنهيار للعينة المدعمة بصفائح الكربون حسب معيار Tsi–Wu للطبقة العلوية... ١٢٩
الشكل رقم (٢٨,٦): معامل الإنهيار للعينة المدعمة بصفائح الكربون حسب معيار Tsi–Wu للطبقة السفلية....١٢٩
الشكل رقم (٢٩,٦): معاملات الإنهيار للطبقة العلوية للعينة المدعمة بألياف الكربون حسب معيار Tsi–Wu .١٣٢
الشكل رقم (٣٠,٦): معاملات الإنهيار للطبقة العلوية المدعمة بألياف الكربون حسب معيار الإجهاد الأعظمي.١٣٢

قائمة المصطلحات والاختصارات باللغتين العربية والإنكليزية

المصطلح باللغة العربية	مقابله باللغة الإنكليزية
المواد المركبة	Composite Materials
البوليميرات	Polymers
المادة الرابطة	Matrix Material
المواد المركبة المدعمة بالألياف	Fibers reinforced Composites
مواد مركبة متعددة الطبقات	Laminated Composites
بوليميرات التصلب الحراري	Polymers Thermoset
الألياف	Fibers
الجناح	Spar
ألياف الأراميد	kevlar
طريقة القالب المفتوح	Open Contact Moudling
طريقة القولبة بإنتقال الريزين	Resin Moldling Transfer
القولبة بالضغط	Compression molding
معايير الإنهيار	Failure Criteria
طريقة القولبة بالسحب	Pultrusion method
الجساءة	Stiffness
طريقة اللف الآلي	Filament winding
نوع العنصر	Element Type

Mesh Generation	شبكة العناصر المنتهية
Orthotropic Materials	غير متماثلة المناحي
Ansys workbench	برنامج العناصر المنتهية
Maximum stress failure Criterion	معيار الإجهاد الأعظمي
Maximum Strain Failure Criterion	معيار التشوه الأعظمي
Tsai-Hill Failure Criterion	معيار تساي-هيل
Isotropic Materials	المواد المتماثلة المناحي
Epoxy Resin	راتنج الإيبوكسي
Plastic Matrix	مركبات ذات أساس بولميري
Composite Metal Matrix	مركبات ذات أساس معدني
Composite Ceramic Matrix	مركبات ذات أساس سيراميكي

قائمة الرموز

المصطلح أو المادة	الرمز
معامل يونغ	**E**
ستريوبور (البولستيرين الموسع)	**EPS**
معامل الانهيار	**e**
مركبات ذات أساس سيراميكي	**CMC**
مركبات ذات أساس معدني	**MMC**
مركبات ذات أساس بولميري	**PMC**
الإجهاد الأعظمي	**σmax**
متانة الكسر	**Rmax**
التشوه الأعظمي	**εmax**
النسبة الحجمية للألياف	**Vf**
النسبة الحجمية للمادة الرابطة	**Vm**
النسبة الوزنية للألياف	**Wf**
النسبة الوزنية للمادة الرابطة	**Wm**
الكثافة النظرية للمادة المركبة	**ρc**
الكثافة التجريبية للمادة المركبة	**ρc,exp**

Vv	المسامية
g	عينات شد مادة مركبة **3** طبقات من ألياف الزجاج + الإيبوكسي
c	عينات شد مادة مركبة ٣ طبقات من ألياف الكربون + الإيبوكسي
k	عينات شد مادة مركبة **3** طبقات من ألياف الكيفلر + الإيبوكسي
w	عينات شد مادة مركبة **3** طبقات من ألياف الهجين + الإيبوكسي
b–g	عينات انحناء مادة مركبة **3** طبقات من ألياف الزجاج + الإيبوكسي + ستريوبور
b–c	عينات انحناء مادة مركبة **3** طبقات من ألياف الزجاج + الإيبوكسي + ستريوبور
b–k	عينات انحناء مادة مركبة **3** طبقات من ألياف الزجاج + الإيبوكسي + ستريوبور
b–w	عينات انحناء مادة مركبة **3** طبقات من ألياف الزجاج + الإيبوكسي + ستريوبور

المستخلص

تناول هذا البحث إجراء اختبار الشد على عينات محضرة من مواد مركبة بولميرية والتي تتألف من راتنج الإيبوكسي كمادة رابطة والألياف الصناعية (كربون- زجاج-كيفلر-هجين بين الكربون والكيفلر) كمادة تقوية، كما تم إجراء اختبار الانحناء على عينات تتكون من نفس صفائح المواد المركبة البولميرية المستخدمة في اختبار الشد كطبقة علوية وسفلية وبينهما مادة الستريوبور كمادة حشو.

من اختبار الشد تم استنتاج الخواص الميكانيكية لصفائح المواد المركبة حيث بلغت أعظم قوة شد 10425 Mpa لصفيحة الإيبوكسي مع ألياف الكربون وأعظم استطالة ناتجة عن الشد لصفيحة الإيبوكسي مع ألياف الكيفلر وتبلغ 5.02mm ووجدنا أن جميع العينات تسلك سلوك شبه خطي.

من اختبار الانحناء تم استنتاج أعظم مقاومة للانحناء للعينات الأربعة والتي بلغت 97Mpa للعينة المقواة بألياف الكربون وبلغت العينة المقواة بألياف الكربون أعظم استطالة وتبلغ 6.15mm.

تناول هذا البحث أيضا اجراء محاكاة عددية عن طريق برنامج الـ Ansys لاختباري الشد والانحناء لعينة واحدة من كل نوع من الأنواع الأربعة ذات الألياف المختلفة، ووجدنا بعد مقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج التجريبية بأن النتائج متقاربة بنسب مقبولة للكثير من العينات.

من خلال المحاكاة أيضا تمت دراسة الانهيار لطبقات المواد المركبة لعينات الشد والانحناء واستنتاج معاملات الانهيار لأكثر من معيار من معايير انهيار المواد المركبة في برنامج الـ Ansys، وكانت قيم معامل الانهيار متقاربة إلى حد كبير بين العينات المختلفة.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة البولميرية، ألياف الزجاج، ألياف الكيفلر، ألياف الهجين، راتنج الايبوكسي، الستريوبور، المحاكاة باستخدام Ansys.

الفصل الأول: الإطار العام للبحث

Research methodological framework

١-١ المقدمة (INTRODUCTION):

يعتبر الطيران الصغير قفزة نوعية في تاريخ الصناعة العالمية وعلى وجه الخصوص الطائرات التي تستخدم لأغراض عسكرية، وترتكز حاليا صناعة هياكل مثل هذه الأنظمة في الدول المتقدمة على المواد المركبة البولميرية، حيث تعد المواد المركبة أداة مهمة في تطور الصناعات بكافة فروعها لما حققته من خصائص ميكانيكية وفيزيائية جيدة في كافة الصناعات والاستعمالات بالمقارنة مع المواد التقليدية المستخدمة كالمعادن مثلاً، فبرز استخدامها بكثرة في مجال الصناعات الفضائية والصناعات البحرية والبرية وخاصة العسكرية منها، وأوليت اهتماماً خاصاً من الدول المتقدمة صناعياً لما لهذه الصناعات من أهمية خاصة في مجال السطع والبث والتجسس والحروب الذكية وكافة مجالات الحياة.

في بحثنا هذا سوف نعتمد على المواد المركبة البولميرية والتي تتألف بشكل أساسي من ألياف صناعية (Faiber) ومواد رابطة (Resin)، بالإضافة إلى مادة الستريوبور، حيث يتم إنتاج نموذج من جناح من الستريوبور مدعماً بالمواد المركبة البولميرية وتطبيق عدة اختبارات لاختبار الشد والانحناء عليه وتوثيق النتائج التي سنتوصل إليها ومقارنتها بنتائج دراسات مرجعية مماثلة لها، بحيث يتم تسخيرها بشكل فعال والاستفادة القصوى منها لتدعم هذه الأنواع من الصناعات والتي بدورها تدعم التطور التكنولوجي في الصناعة.

١-٢ الإشكالية البحثية (RESEARCH PROBLEM):

عند تصنيع هياكل الطيران من المواد المركبة البولميرية، كجسم الطائرة أو جناحها أو ذيلها ونتيجة الاختلاف الكبير بين خواص المنتج المصنع عند حدوث أي تغيير في طريقة التصنيع أو نوع المواد والألياف الداخلة في تركيبها أو حتى عندما نقوم بتغيير اليد العاملة التي لها التأثير الكبير على جودة التصنيع والمنتج النهائي، ونتيجة لهذه الأسباب مجتمعة برزت مشاكل تصميمية لدى مهندسي الطيران عند تصميم نماذج من هياكل الطيران، لذا كان من المهم البحث في خواص المواد المركبة البولميرية ومكوناتها الداخلة في تكوين تلك الهياكل وتمت هذه الدراسة انطلاقا من هذه المشكلة المرافقة لهذا النوع من المواد الغير متجانسة الخواص، بالإضافة إلى مشكلة أخرى شديدة الأهمية في عالم الطيران وهي البحث على الصعيد المحلي عن طرق تصنيع جديدة في مجال تصنيع إنشاءات المواد المركبة لاستخدامات

مختلفة (هياكل سيارات – طيران مسير– سفن فضائية .....) تعتمد على مواد أكثر وفرة وذات خواص جيدة ورخيصة الثمن وخفيفة الوزن والسعي للحصول على نتائج قريبة ومشابهة للصناعات العالمية في هذا المجال وكذلك الأمر للمواد المستخدمة كمادة حشو ضمن هياكل المواد المركبة والاستغناء عن المواد المعدنية والخشبية والتي تعتبر مواد ثقيلة على انظمة الطيران.

١–٣ تساؤلات البحث

هنالك العديد من التساؤلات التي قادتنا لإجراء هذا البحث ولإشباع الرغبة في اكتشاف مواد وطرق جديدة وجديرة بالاهتمام بها للارتقاء للأفضل في صناعات هياكل المواد المركبة واستنتاج خواص المواد الداخلة في تركيبها والداخلة في تصنيع الاجنحة في الطيران المسير نذكر منها:

- هل يوجد مواد بديلة عن المواد التقليدية المستخدمة في مجال إنشاء الهياكل وبنفس الخواص الميكانيكية؟
- هل يمكن الحصول على طرق تصنيع بمواد لا تحتاج لمعدات وأدوات ضخمة وذات تكلفة عالية من حيث شرائها أو إنتاجها كالروافع الضخمة وآلات قص المعادن الثقيلة؟
- لما لا نبحث عن مواد يمكن إصلاح الأجزاء المصنوعة منها في حال الأعطال؟
- والتساؤل الأهم: كيف السبيل لإنتاج مواد بخصائص ميكإنيكية عالية وبوزن خفيف وبحمل مفيد؟

١–٤ فرضيات البحث (RESEARCH HYPOTHESES):

يقوم بحثنا هذا على فرض إن النموذج المصنوع من المواد المذكوره سابقا وهي المواد المركبة التي تتألف من الألياف والإيبوكسي مع المقسي التي تمثل المادة الرابطة، سوف يحقق خواص جيدة (خفة الوزن– المتإنة– متإنة على الصدم) وتتميز على المواد التقليدية التي تستخدم في الصناعات الثقيلة بإنها تعطي نفس الخواص والميزات تقريبا ولكن بتكلفة أقل ووقت أقل ووفرة في استخدام الالات واليد العاملة، وسوف نقوم بتصنيع وتنفيذ النموذج المطلوب وإجراء الاختبارات اللازمة من شد وإنحناء وغيرها للتحقق والتأكد من فرضيتنا تلك كما أوردنا في فصولنا اللاحقة.

١–٥ هدف البحث (RESEARCH OBJECTIVE):

تقديم دراسة نظرية وعملية عن المواد التي سوف يتم استخدامها في هذا البحث والتي تم تصنيع جناح طائرة مسيرة صغيرة منها، ومحاولة تصنيع عينات قياسة إلى أقرب حد ممكن، وتنفيذ عدة اختبارات معيارية على النماذج والعينات المصنوعة محلياً من الستريوبور المدعم بالمواد المركبة البولميرية والتي تعتمد على ألياف صناعية مختلفة كألياف الزجاج والكربون والكيفلر والهجينة بين الكيفلر والكربون، ودراسة تلك العينات وتنفيذ الاختبارات الميكانيكية لاستنتاج خواصها الميكانيكية ودراستها عدديا باستخدام برامج هندسية مساعدة كبرنامج الـ Ansys، ومقارنة النتائج لبن الدراسة

المخبرية والدراسة العددية لتقييم مدى إمكإنية استخدام تلك المواد لهذا الغرض بالشكل الأمثل، بالإضافة إلى منح أفق جديدة لأعمال بحثية مشابهة ومحأولة اعتماد هذه الدراسة في الكثير من الصناعات المحلية والتي توفر الكثير من الوقت والمواد واليد العاملة.

١-٦ أهمية البحث (RESEARCH IMPORTANCE):

يواجه التطور التكنولوجي في صناعة الهياكل المصنعة من المواد المركبة البولميرية محليا صعوبة كبيرة في تأمين المواد اللازمة للتصنيع نظراً لقلة الدول المصنعة لها ولسعرها المرتفع ولصعوبة نقلها لإنها تحتاج لشروط مثالية في النقل كونها مواد غير أمنة صحيا وسريعة التغير بخواصها الميكانيكية والفيزيائية عند تعرضها لشروط غير مناسبة كالحرارة العالية أو التجمد وغيرها من العوامل الأخرى، إضافة إلى إنها تحتاج لتجهيزات كثيرة وحساسة أثناء العمل على اليد العاملة نظرا لتأثيرها السمي على جسم الإنسان.

لذلك سيعرض في هذا البحث دراسة عن المواد المقترحة الداخلة في تصنيع الجناح وتوصيف خواصها الميكانيكية وإجراء اختبارات عليها مشابهة لظروف عملها وتوثيق النتائج التي تم التوصل إليها بغية وضع استراتيجية عمل تمكن المصنع من إتباعها عند تصنيع منتج قائم على تلك المواد.

١-٧ حدود الدراسة (STUDY LIMITS):

في البداية كإن لابد من تجهيز المواد اللازمة من ستريوبور ومواد راتنجية كالإيبوكسي والمقسي بالإضافة إلى الألياف الصناعية لتصنيع العينات بالخواص المطلوبة.

كإن تصنيع العينات المطلوبة لإجراء الاختبارات أمرا ليس بالسهل نتيجة الصعوبة في تأمين المواد، حيث جرت عمليات التصنيع في مخابر وورش تصنيع المواد المركبة البولميرية المحلية وإنتاج عينات خاصة باختبار الشد وعينات خاصة باختبار الانحناء وفي الاختبارين تم الاعتماد على مواصفات قياسية عالمية حسب ASTM، وهذا ماتطلب المزيد من الوقت والجهد في سبيل إنتاج هذه العينات وإجراء الاختبارات المطلوبة.

يتطلب هذا البحث وجود الات الاختبار المناسبة لاختباراتنا التي سوف نجريها في بحثنا هذا كاختبار الشد والانحناء ويتطلب من هذه الالات أكثر دقة ممكنه من أجل اعطاء قيم حقيقية أكثر ما يمكن، وتم الاستفادة من مخابر كلية الهندسة الميكانيكية في جامعة دمشق التي تحوي على بعض الالات المناسبة للاختبارات المطلوبة، وتمت الاستفادة أيضا من مخبر الاختبارات الميكانيكية في المعهد العالي للدراسات التكنولوجية في دمشق لاجراء الاختبارات الواردة في هذا البحث.

١-٨ منهج البحث، وأدواته (RESEARCH METHODOLOGY):

اعتمد هذا البحث في منهجية عمله بالأدوات المتوفرة على عدة خطوات، نذكرها باختصار:

- تأمين المواد الأولية الأساسية لهذا البحث بالإضافة إلى أدوات التحضير والعمل في الورش.
- تصنيع عينات الشد حسب مواصفة قياسية عالمية وإجراء اختبار الشد عليها وتسجيل النتائج والخواص الميكانيكية المستنتجة من الألة ومن الحسابات والمعادلات.
- تصنيع عينات الانحناء حسب مواصفة قياسية عالمية واجراء اختبار الانحناء عليها وتسجيل النتائج.
- إجراء نمذجة عددية للاختبارين السابقين على برامج المحاكاة.
- مقارنة النتائج التجريبية والعددية.

هذا البحث اتبع منهجية متكاملة لبن المعطيات النظرية الواردة فيه والمأخوذه من عدة دراسات سابقة وبين الخطوات العملية من خلال عمليات التحضير والتصنيع والاختبار واستنتاج الخواص الميكانيكية.

١-٩ مكونات البحث : (RESEARCH COMPONENTS):

قُسِم البحث إلى سبعة فصول متكاملة المعلومات النظرية والعملية حيث إنها اشتملت على كل مايتعلق بالمواد المركبة البوليميرية والستيربور وسنورد فيما يلي مكونات وأقسام وفصول هذا البحث وهي على الترتيب التالي:

- الفصل الأول: وهو الإطار العام للبحث حيث يحتوي على أساسيات البحث التي قام عليها من عنوان للبحث و أهميته ومشكلته وتساؤلاته وحدوده وأدواته وهدفه ومكوناته ومنهجه.
- الفصل الثاني: يحتوي الفصل الثاني على معلومات نظرية واسعة شملت المواد المركبة البولميرية ومكوناتها من ألياف وإيبوكسي ومقسي، مع ذكر خواصها كمواد منفردة وابراز طرق تصنيعها وتجهيزها وأهم الشروط المطلوبة في التصنيع بالإضافة إلى دراسة معايير إنهيارها.
- الفصل الثالث: ورد بهذا الفصل شرح توضيحي حول خصائص الستريوبور الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية وطرق تصنيعه بالإضافة إلى تقديم بعض المعلومات عن الهياكل المركبة التي صنعنا نموذج اختبارنا على شكلها.

- الفصل الرابع: جرى الحديث فيه عن عدة دراسات مرجعية تم الاعتماد عليها في اختيار المواصفة القياسية للتصنيع وطلاق الاختبار وترتيب فقرات وخطوات البحث.
- الفصل الخامس: يحوي على الإطار العملي للبحث، وتضمن معلومات عن خواص المواد المستخدمة وتوصيف للعينات المستخدمة وطريقة النمذجع على برنامج المحاكاة.
- الفصل السادس: عرض فيه النتائج التي تم التوصل إليها والمقارنة بين الدراسة التجريبية والعددية.
- الفصل السابع: وهو فصل الخلاصه والاستنتاجات والتوصيات.

وبهذه الفصول السبعة والمتكاملة المعلومات والمرتبطة ببعضها وفق تسلسل منطقي للمعلومات المطروحة والمستنتجة تم تكوين هذا البحث وتشكيله، بحيث يقدم معلومات متنوعه عن ماهية وخواص المواد المستخدمة فية وطرق الاختبار والقياس المستخدمة، وعرض الاستنتاجات التي تمت فيه والمقارنة بدراسات مرجعية سابقة وبدراسات عددية تمت في هذا البحث.

الفصل الثاني: المواد المركبة ذات الأساس البوليميري

THE POLYMER MATRIX COMPOSITES

٢-١ تمهيد (Preface):

سنتحدث في هذا الفصل عن المواد المركبة وتاريخها وأهميتها التي أعطت الفرصة للعلماء بالخوض فيها ودراستها واستنتاج خواصها سواء بالدراسة العملية أو النظرية أو بالاستعانة ببرامج الدراسة العددية، فهذه المواد بدأت تظهر أهميتها منذ بدايات وجود الإنسان ولكن لم يستخدمها بالشكل الأمثل حيث تطور استخدامها مع التقدم الصناعي والتجاري، لذا سنعرض في هذا الفصل معلومات واسعة عن دراسة هذه المواد وسنتعمق بالحديث عن مكوناتها وخواص كل مكون منها سواء بمفرده أو مجتمع مع غيره من المواد الداخلة في التركيب.

وسنعرض شرح مفصل عن إنهيار مثل هذه المواد مع تحديد سلوكها والتنبأ بخطر إنهيارها، والتحدث عن معايير إنهيارها والمعادلات اللازمة والمستخدمة في تلك المعايير، بالإضافة إلى تقديم بعض المعلومات التي تدخل في صلب الدراسة الميكانيكية للمواد المركبة البولميرية والتي سنستخدمها في الجزء العملي من هذا البحث.

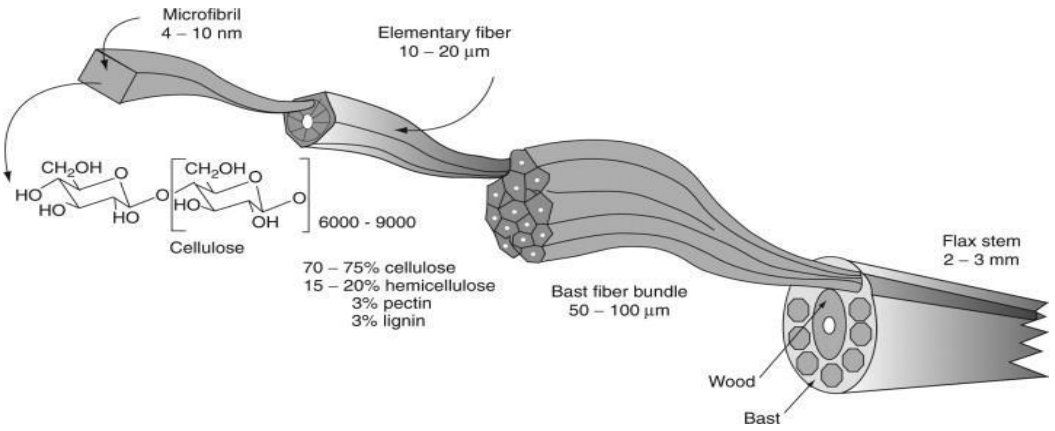
٢-٢ مقدمة عامة

لعبت المواد المركبة دورا مهما عبر تاريخ البشرية، بدءا من الحضارات المبكرة وصولا للإبتكارات المستقبلية، حيث حققت تقدم متسارع في كافة المجالات سواء الاقتصادية أو العسكرية حيث دخلت عالم الصناعات العسكرية بقوة كما في المركبات الفضائية والطائرات الحربية والمسيرة وصناعة الصواريخ وتناغمت مع المتطلبات العصرية من قدرة تحمل درجات حرارة عالية أو تحملها السرعات العالية والعمل في جميع الظروف الجوية، فهي تقدم فوائد عديدة أهمها مقاومة التآكل، ومرونة التصميم، والمتانة، والمقاومة، والوزن الخفيف، بالإضافة الى ذلك لم تتوقف أهميتها عند الصناعات العسكرية فقط بل أصبحت للمواد المركبة دور في جميع مجالات حياتنا اليومية كالمنتجات المستخدمة في التطبيقات الإنشائية والطبية والنفط والغاز والنقل البري والبحري والرياضة وغيرها الكثير من التطبيقات، حتى إن بعض التطبيقات لا يمكنها إن تتحقق بدون المواد المركبة.

٢-٣ تاريخ المواد المركبة

يعود نشوء المواد المركبة بشكلها المتعارف عليه في الوقت الحالي الى أربعينيات القرن الماضي، ومنذ ذلك الوقت تطورت المواد المركبة بشكل كبير جدا ويعود الفضل في تطورها وانتشارها الى الخواص الممتازة التي تتمتع بها ومن أهمها المتانة العالية مع خفة الوزن.

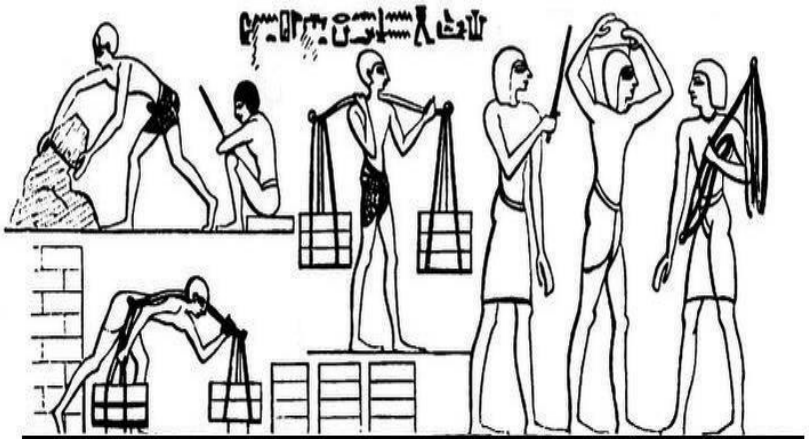
فاالمواد المركبة موجودة في الطبيعة، فقطعة الخشب، على سبيل المثال، هي عبارة عن مادة مركبة تتألف من مادة حاضنة تسمى اللجنين مع ألياف سليلوز طويلة متماسكة معا، يبين الشكل(١,٢) بنية مادة الخشب.



الشكل رقم (١,٢): بنية مادة الخشب

يستخدم البشر المواد المركبة منذ آلاف السنين في مناطق وحضارات مختلفة، وتعود الاستخدامات الأولى للمواد المركبة إلى حضارات بلد ما بين النهرين، حيث قام هؤلاء القدماء بلصق شرائح الخشب بزوايا مختلفة لإنشاء خشب رقائقي في ٣٤٠٠ قبل الميلاد.

في عام ١٥٠٠ قبل الميلاد، استخدم المصريون الأوائل وحضارات بلد ما بين النهرين خليطاً مكوناً من الطين والقش لإنشاء مبإن مقاومة ومتينة، حيث يوفر الجمع بين الطين والقش في كتلة من الطوب خصائص مقاومة عالية ضد كل من الضغط والإهتراء والانحناء، يبين الشكل(٢,٢) تشييد المبإني في الحضارات المصرية القديمة.



الشكل رقم (٢,٢): تشييد المبإني في الحضارة المصرية القديمة[48]

نشأت العديد من التطورات في المواد المركبة نتيجة الاحتياجات زمن الحرب، فخلال الحرب العالمية الثانية، تم تطوير العديد من المواد المركبة ونقلها من المختبرات إلى الإنتاج الفعلي وأدت هذه الحاجة لتطوير المواد المركبة إلى صناعة المواد المركبة من مادة حاضنة بوليميرية ومقواة بالألياف، ففي عام ١٩٤٥، تم استخدام أكثر من ٧ ملايين رطل من الألياف الزجاجية والكربونية لمنتجات مختلفة، وكإنت التطبيقات العسكرية في المرتبة الأولى.

استمرت المواد المركبة في التقدم بعد الحرب ونمت بسرعة خلال فترة الخمسينيات، وعمل المخترعون والمصنعون على إدخال المواد المركبة من مادة حاضنة بوليميرية ضمن مجالات القطاع العام مثل الفضاء والبناء وخاصة النقل، حيث تم تقديم أول هيكل للقارب في عام ١٩٤٦، وتم تصنيع واختبار هيكل السيارة بالكامل من المواد المركبة في عام 1947، يبين الشكل(٣,٢) هيكل طيارة مسيرة وقارب من مادة مركبة مقواة بالألياف الزجاجية[1].

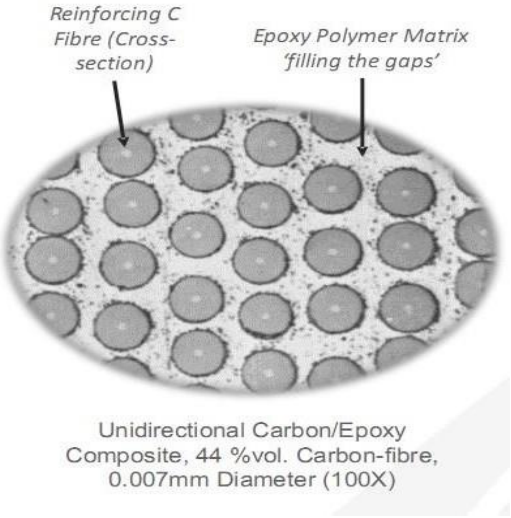
الشكل رقم (٣,٢): هيكل طائرة وقارب من مادة مركبة مقواة بألياف الزجاج.

٢-٤ التعريف بالمواد المركبة

المواد المركبة هي اجتماع مادتين مختلفتين أو أكثر عبر سطح بيني بهدف الحصول على مادة جديدة تتفوق في أدائها على مكوناتها منفردة، من هنا، تكون المواد المركبة غير متجانسة (non-homogenous) وغير متجانسة المناحي، وتمتلك خصائص عالية لا يمكن الحصول عليها باستعمال المواد التقليدية.

تتكون المواد المركبة من مادة أو أكثر غير مستمرة موزعة في مادة أخرى مستمرة، وفي الحالة الطبيعية، تكون المادة غير المستمرة أقوى وأكثر متانة من المادة المستمرة، ولهذا يطلق على المادة غير المستمرة اسم مادة التقوية، وتكون على أشكال عديدة فمثلا تكون على شكل حبيبات (Particulates) أو على شكل ألياف (Fibers) أو على شكل صفيحات (Flakes) أو على شكل صفائح (Laminas) وهذه المادة تكون مسؤولة عن الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة، ويطلق على المادة المستمرة اسم المادة الرابطة (Matrix) أو الحاضنة لمادة التقوية، وتكون مسؤولة عن

تماسك المادة المركبة وحمايتها من العوامل الخارجية، ونقل الإجهادات وتوزيعها على عناصر مادة التقوية، والشكل (٤,٢) يوضح مقطع مكبر لمادة مركبة من ألياف الكربون– إيبوكسي[8].



الشكل رقم (٤,٢): مقطع مكبر لمادة مركبة من ألياف الكربون– الإيبوكسي.

٢–٥ تطور استخدام المواد المركبة في الطيران

المواد المركبة هي مواد هندسية تصنع بدمج مادتين أو أكثر لينتج عنها مادة ذات خواص جديدة تختلف عن خواص مركباتها، إن التعريف السابق تعريف عام جدا حيث إنه يشمل كلا من المعادن والخلائط والبلاستيك والخشب، حيث استخدم الإنسإن المواد المركبة منذ قرون عن طريق الخلط بين الغضار والتبن المستعمل قي بناء المنازل، ولاتزال هذه المادة تستخدم حتى يومنا هذا في بعض المناطق والقرى الريفية السورية.

قام الأخوين Orville & Wilbur Wright بتصنيع أول طائرة مزودة بمحرك، حيث استخدم مواد مركبة مكونة من القماش والفينول لتشكيل الأجزاء الخارجية متمثلتا بالقشرة الخارجية للطائرة.

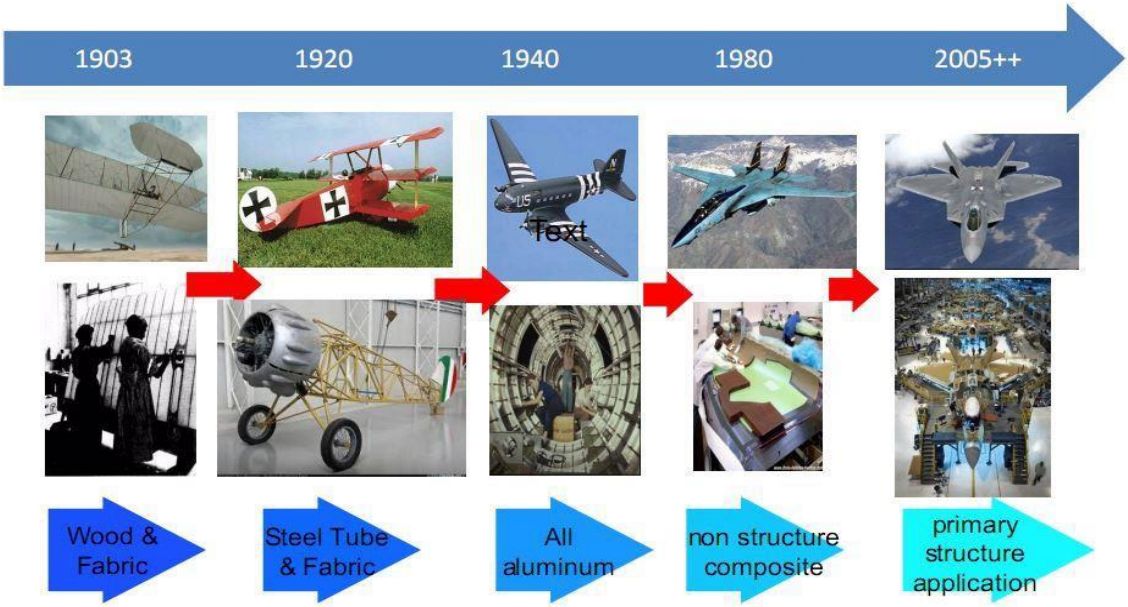
وأخذت أهمية صناعة الطائرات الحربية أهمية كبيرة عند وقوع الحرب العالمية الأولى والثإنية، حيث أصبح التركيز منصبا على تطوير الطائرات وأدائها عبر تقليل الوزن الجسم والهيكل بشكل عام مما يزيد من نسبة الوزن المفيد الذي تحمله الطائرة.

يعتمد التصنيع المثالي للطائرات عن طريق البحث وإيجاد مواد خفيفة الوزن وذات متإنة عالية تستعمل في صناعة الطائرات، ومن أهم هذه المواد الخشب حيث تم استخدامه في بدايات التصنيع للطيرإن ثم تم استخدام الألمنيوم وسبائكه الخفيف الوزن وذو المتإنة الجيدة، ولكن مع التقدم السريع في هذا المجال من الصناعات لم تعد المواد المستخدمة سابقا

تفي بالغرض لذا بدأ البحث عن مواد تناسب الحمولات العالية والوزن والسرعات العالية القدرة على التخفي من الأمواج الكهرطيسية المستخدمة في الكشف عن الطائرات.

وبدأ استخدام المواد المركبة المقواة بالألياف التي تخاف خواصها ومزاياها عن المواد السابقة حيث تختلف بمكوناتها وخواص كل مكون والتي تعمل بعد مزجها مع بعضها البعض وتحسن من الخواص سواء الميكانيكية أو الحرارية وغيرها من الخواص الأخرى ولكنها تبقى محافظة على شكلها الأساسي.

وتطور استعمال المواد المركبة في تصنيع الطائرات كما هو موضح في الشكل رقم (٥,٢) وارتفعت نسبة وجودها داخل هيكل الطائرة، ففي البداية اقتصرت صناعة الأغطية الإنسيابية (Aerodynamic Fairing) فقط من المواد المركبة في الطائرات ثم تطورت إلى تصنيع أجزاء أخرى كمدادات الجناح (Spar) والأضلع العرضية (Ribs) وفي يومنا هذا أصبحت تنتج طائرة كاملة من المواد المركبة[4].



الشكل رقم (٥,٢): تطور تصنيع هياكل الطائرات

٢-٦ أهمية المواد المركبة

تعتبر المواد المركبة من أهم المواد المستخدمة في كافة الصناعات التقليدية والصناعات الحساسة كالصناعات الفضائية من أقمار صناعية وطائرات لقد سأهمت عدة عوامل في دفع عملية تطوير المواد المركبة منذ بداية ظهورها، ومن أهم هذه العوامل:

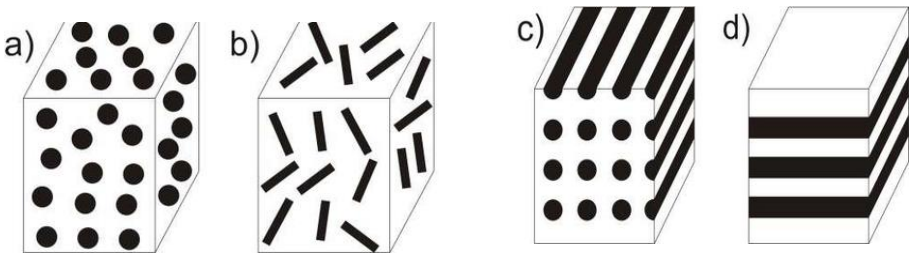
- الحاجة إلى تطوير أداء المركبات والمعدات العسكرية كالطائرات النفاثة والطائرات العمودية والصواريخ، حيث كإن للمواد المركبة ميزات كبيرة من حيث خفة وزنها نسبة و متإنتها العالية، وأصبح بالإمكإن استخدام المواد المركبة كبديل لكثير من القطع المعدنية لرفع كفاءة الطائرات وزيادة الحمولة الاسمية.
- التطور الكبير الذي طرأ على الصناعات البوليميرية وتعريف الأسواق بالمزايا الكبيرة لهذه المنتجات الخفيفة الوزن أدى إلى زيادة الاستثمار المطروح لتطوير المواد البوليميرية وزيادة متإنتها وخواصها الإنشائية.
- اكتشاف الخواص الكبيرة التي تتمتع بها بعض المواد مثل الألياف الزجاجية أدى إلى البحث عن طرق جديدة لاستثمار المزايا العالية التي تتمتع بها هذه المواد لتلبية الاحتياجات العسكرية بشكل خاص.

٢-٧ تصنيف المواد المركبة

المواد المركبة هي مواد تتألف من مادتين أو أكثر كما ذكر سابقا لذلك لها العديد من التصنيفات التي تعتمد على المادة الرابطة أو مادة التقوية، حيث يمكن تصنيف المواد المركبة حسب مادة التقوية (Reinforcements) وفقا لهندسة مادة التقوية إلى أربعة أنواع[9]:

- المواد المركبة الليفية المقواة بألياف (مستمرة أو قصيرة) ضمن مادة رابطة.
- المواد المركبة الحبيبية المقواة باستعمال حبيبات ضمن مادة رابطة.
- المواد المركبة الصفائحية المقواة باستعمال طبقات من مواد تقوية مختلفة.
- مواد مركبة هجينة تتشارك فيها الإنماط الثالثة السابقة أو بعض منها.

ويبين الشكل رقم (٦,٢) تصنيف المواد المركبة وفقاً لمادة التقوية[48].



الشكل رقم (٦,٢): تصنيف المواد المركبة وفقاً لمادة التقوية: a) ألياف قصرة ، b) ألياف قصيرة ، c) أليلف مستمرة ، d) ألياف على شكل طبقة

ويمكن تصنيف المواد المركبة وفقاً للمادة الرابطة (مادة الأساس) بشكل عام إلى ثالثة أنواع:

- مادة مركبة ذات أساس معدني MMC (Metal Matrix Composites).
- مادة مركبة ذات أساس بولميري PMC (polymer Matrix Composites).
- مادة مركبة ذات أساس سيراميكي CMC (Ceramic Composites Matrix).

٢-٨ المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية ومكوناتها

هي مادة مركبة مكونة من مجموعة متنوعة من الألياف القصيرة أو المستمرة المدمجة ضمن مادة الأحمال بين المادة الرابطة والألياف، تشمل بعض مزايا هذه المواد خفة الوزن، والجساءة العالية، والمقاومة العالية على طول اتجاه الألياف، بالإضافة للمقاومة الجيدة للتآكل.

هناك العديد من البوليمرات التي يمكن استخدامها كمادة رابطة ضمن المواد المركبة، وهي تندرج تحت صنفين أساسين وهما:

- بوليميرات التصلب الحراري (Polymers Thermoset).
- بوليميرات التلدن الحراري (Polymers Thermoplastic).

عادة ما تستخدم بوليميرات التصلب الحراري أكثر من بوليميرات التلدن الحراري، وعلى الرغم من التشابه بين هذين الصنفين من البوليميرات، إلا إن لهما خصائص وتطبيقات مختلفة جدا، يمكن إن يساعد فهم الاختلافات في الأداء في اتخاذ قرارات أفضل بشأن تحديد مصادر المواد الداخلة في تركيب المواد المركبة وتصاميم منتجاتها وسيتم شرحها بالتفصيل لاحقا.

تتألف المواد المركبة البولميرية بشكل أساسي من المواد المقوية أو الألياف والمواد الرابطة أو الحاضنة، وفي بعض الأحيان تضاف بعض المواد المالئة، سنقوم بالفقرات التالية بالتعرف على أبرز هذه المكونات والتركيز على المواد المستخدمة في المواد المركبة البلاستيكية المقواة بالألياف وسوف نتحدث بإيجاز عن مكوناتها وهي:

٢-٨-١ المادة الرابطة (Matrix)

تقوم المادة الرابطة بحضن الألياف وضمها ببعضها، كما تقوم بحماية هذه الألياف من العوامل الخارجية والبيئية المحيطة، حتى تقوم المادة الرابطة بعملها بشكل سليم يجب أن تتمتع بمعاملات صلابة أقل وبقابلية استطالة أعلى من الألياف وذلك ضمان أن تقوم الألياف بتحمل الجزء الأكبر من الأحمال.

المعايير الأساسية لاختيار المادة الرابطة تتعلق بالعديد من العوامل ومن أهمها خواصها الحرارية والميكانيكية والكهربائية، إضافة الى عوامل الكلفة والأداء وقابلية وسهولة التصنيع[1].

تتنوع المواد الرابطة حسب نوع المادة المركبة المطلوبة فقد تكون معدنية أو سيراميكية أو كربونية أو بلاستيكية وهي أكثرها شيوعا، ونظرا لأهمية المواد الرابطة البلاستيكية فإننا سنقوم بعرض سريع لها، وتتلخص وظائف المواد الرابطة بمايلي:

- تحافظ على تماسك الألياف وتوزعها في المادة المركبة.
- حماية المادة المركبة من العوامل الخارجية.
- نقل الحموالت الخارجية وتوزيعها على الألياف.
- تتحمل بعض أنواع الحموالت وتحديداً إجهادات القص بين الطبقات واإلجهادات في الثقوب.

تلعب المواد الرابطة دورا هاما في تحديد درجة الحرارة المسموح بها عند تشغيل المادة المركبة، وأكثر المواد الرابطة التي تتأثر بذلك هي الريزينات البلاستيكية والتي تنقسم بدورها الى قسمين: مواد متصلبة حرارياً ومواد البلاستيك الحراري، والجدول رقم (١,٢) يبين درجات حرارة الاستخدام العظمى لأهم المواد البلاستيكية المستخدمة كمواد رابطة.

الجدول رقم (١,٢): درجات حرارة الاستخدام العظمى لأهم المواد البلاستيكية المستخدمة كمواد رابطة

Materials	Maximum Continuous-Use Temperature (°C)
Thermosets	
Vinylester	60–150
Polyester	60–150
Phenolics	70–150
Epoxy	80–215
Cyanate esters	150–250
Bismaleimide	230–320
Thermoplastics	
Polyethylene	50–80
Polypropylene	50–75
Acetal	70–95
Nylon	75–100
Polyester	70–120
PPS	120–220
PEEK	120–250
Teflon	200–260

والمواد الرابطة تنقسم إلى قسمين وهما:

- **المواد البلاستيكية المتصلبة حرارياً:**

المواد البلاستيكية المتصلبة حرارياً تكتسب خواص صلابتها بفضل الروابط المتشابكة ثلاثية الأبعاد التي تنشأ بين سلاسلها، تدعى عملية الترابط هذه بعملية الاستشفاء أو المعالجة، بسبب نشوء هذه الروابط المتشابكة تكتسب المواد

البلاستيكية تصلبها بشكل معقد يمنع عودة ذوابنها مع ارتفاع درجات الحرارة لاحقا وبالتالي لايمكن اعادة تدويرها وتصنيعها من جديد.

إن المواد المتصلبة حراريا تبدي خواصا ميكإنيكية وثباتا حراريا أفضل من مثيلاتها المتلدنة بالحرارة لكنها أصعب من حيث التصنيع نظرا لمتطلباتها الخاصة ولمنع حدوث أي عملية تشابك أو معالجة قبل أخذ الشكل النهائي.

الأنواع الأساسية الأكثر انتشارا للمواد الرابطة المتصلبة بالحرارة: الإيبوكسي، الفينوليك، فينيل ايستر، سيإنات ايستر، البوليأميد، البولي يوريثإن، و الجدول(٢,٢) يوضح خواص بعض مواد البلاستيك المتصلب حراريا[10].

الجدول رقم (٢,٢): خواص بعض مواد البلاستيك المتصلب حراريا

Resin Material	Density (g/cm^3)	Tensile Modulus GPa (10^6 psi)	Tensile Strength MPa (10^3 psi)
Epoxy	1.2–1.4	2.5–5.0 (0.36–0.72)	50–110 (7.2–16)
Phenolic	1.2–1.4	2.7–4.1 (0.4–0.6)	35–60 (5–9)
Polyester	1.1–1.4	1.6–4.1 (0.23–0.6)	35–95 (5.0–13.8)

تتميز بوليميرات التصلب الحراري بما يلي:

- استقراريتها الحرارية ومقأومتها الكيميائية العالية.
- ذات سلوك زحف واسترخاء أقل بكثير من بوليمي ارت التلدن الح اررري.

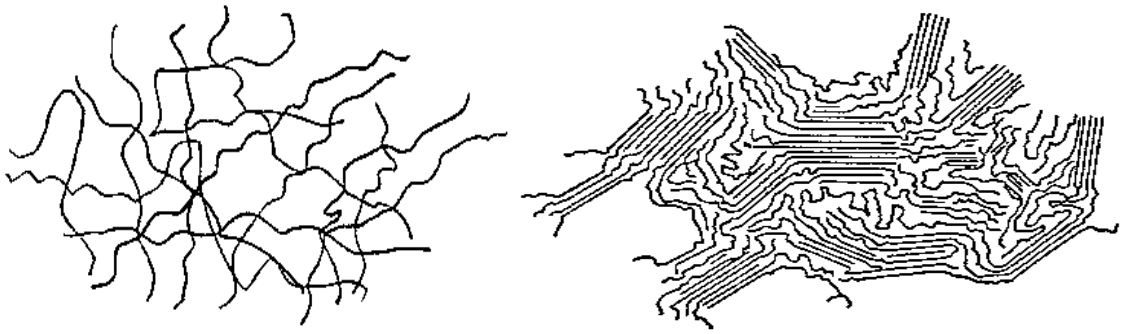
ولكن من مسأوئها:

- زمن تخزين محدود عند درجة حرارة الغرفة قبل التشكيل عند إضافة عوامل التصالب.
- تحتاج لزمن أطول في القولبة حتى تتم تفاعالت البلمرة.
- تتمتع بتشوه قليل قبل الإنهيار.
- ذات مقاومة قليلة للصدم.

- **المواد البلاستيكية المتلدنة حراريا:**

المواد البلاستيكية الحرارية تتمتع بخاصية التلدن مع ارتفاع الحرارة ويستمر التلدين مع استمرار ارتفاع الحرارة حتى الإنصهار والوصول الى الحالة السائلة. يعود الفضل لهذه الخواص الى عدم وجود ترابط متشعب بين السلاسل البوليميرية.

تتواجد مواد البلاستيك الحراري بشكل كريستالي (بلوري) أو لابلوري وذلك حسب إنتظام السلاسل البوليميرية لكن من الصعب وجود مواد بلورية بالكامل لذلك عمليا تتواجد مواد البلاستيك الحراري بشكل شبه بلوري أو لابلوري كما هو موضح في الشكل رقم (٧,٢)، وبشكل عام فإن خواص المواد البلاستيكية المتلدنة بالحرارة ضعيفة نسبيا وهي محدودة الاستخدام في التطبيقات الإنشائية، لكن عند تدعيمها بالألياف تتحول الى مواد مركبة ذات تطبيقات واسعة جدا[9].



b a

الشكل(٧,٢) سلاسل مواد البلاستيك الحراري:

a) سلاسل شبه بلورية b) سلاسل لابلورية

أهم أنواع مواد البلاستيك الحراري المستخدمة في المواد المركبة: النايلون، البولي بروبلين، بولي إيثر إيثركيتون (PEEK) وغيرها من المواد المختلفة، وفيما يلي نلخص ميزات هذه المواد وهي:

- تشوه كبير قبل الإنهيار.
- مقاومة عالية لتشكل الشقوق المجهرية مما يزيد مقاومة المواد المركبة للإنفصال بين الطبقات.
- زمن تخزين المحدود في درجة حرارة الغرفة.
- زمن قولبة قصير.
- سهولة الوصل والإصلاح عن طريق اللحام الحراري.
- إمكانية إعادة التدوير والاستعمال

والجدول رقم (٣,٢) يوضح خواص بعض مواد البلاستيك الحراري

الجدول رقم (٣,٢): خواص بعض مواد البلاستيك الحراري

Resin Material	Density (g/cm^3)	Tensile Modulus GPa (10^6 psi)	Tensile Strength MPa (10^3 psi)
Nylon	1.1	1.3–3.5 (0.2–0.5)	55–90 (8–13)
PEEK	1.3–1.35	3.5–4.4 (0.5–0.6)	100 (14.5)
PPS	1.3–1.4	3.4 (0.49)	80 (11.6)
Polyester	1.3–1.4	2.1–2.8 (0.3–0.4)	55–60 (8–8.7)
Polycarbonate	1.2	2.1–3.5 (0.3–0.5)	55–70 (8–10)
Acetal	1.4	3.5 (0.5)	70 (10)
Polyethylene	0.9–1.0	0.7–1.4 (0.1–0.2)	20–35 (2.9–5)
Teflon	2.1–2.3	—	10–35 (1.5–5.0)

٢-٨-٢ الألياف (Fibers)

تستخدم الألياف لتقوية المواد المركبة، وهي التي تؤمن الجساءة والمتانة والصلابة للمواد المركبة، تأخذ الألياف شكلا قضيبيا بقطر صغير مع اختلاف أطوالها حسب التطبيق، أكثر أنواع الألياف شيوعا هي ألياف الكربون والألياف الزجاجية وألياف البورون وألياف الأرميد، تتراوح أقطار الألياف الشائعة ما بين (٥-١٠) ميكرو متر وقد تكون أكبر من ذلك حيث تصل في بعض ألياف الأرميد الى ١٠٠ميكرو متر.

بفضل القطر الصغير للألياف، تكتسب الألياف خواص مرونة عالية بالاضافة الى القابلية الكبيرة لأخذ الشكل المطلوب، وبشكل عام يمكن إن تأخذ الألياف شكلا مفردا أو إن تأخذ شكل جديلة ثم تلف على بكرات ليسهل تداولها تجاريا.

تعتبر الألياف في المواد المركبة البولميرية هي الأساس في تحمل الحمولات والإجهادات التي تتعرض لها المواد المركبة ونذكر بعض من مزاياها [9]:

- تحمل الأحمال المطبقة على المادة المركبة حيث إنها تحمل حوالي ٧٠ – ٩٠% من إجمالي الحمل في المواد المركبة الإنشائية.
- تأمين الصلابة والمتانة والثبات الحراري وغيرها من الخواص الأساسية للمواد المركبة.

- تأمين الناقلية أو العازلية الكهربائية حسب نوع الألياف.

وتأخذ الألياف أشكالا متعددة بحسب التطبيق المستخدم، وفيما يلي أبرز أشكالها:

- ألياف مستمرة طويلة
- ألياف متقطعة
- ألياف منسوجة
- ألياف مشبعة بالريزين
- ألياف مشكلة بشكل مسبق

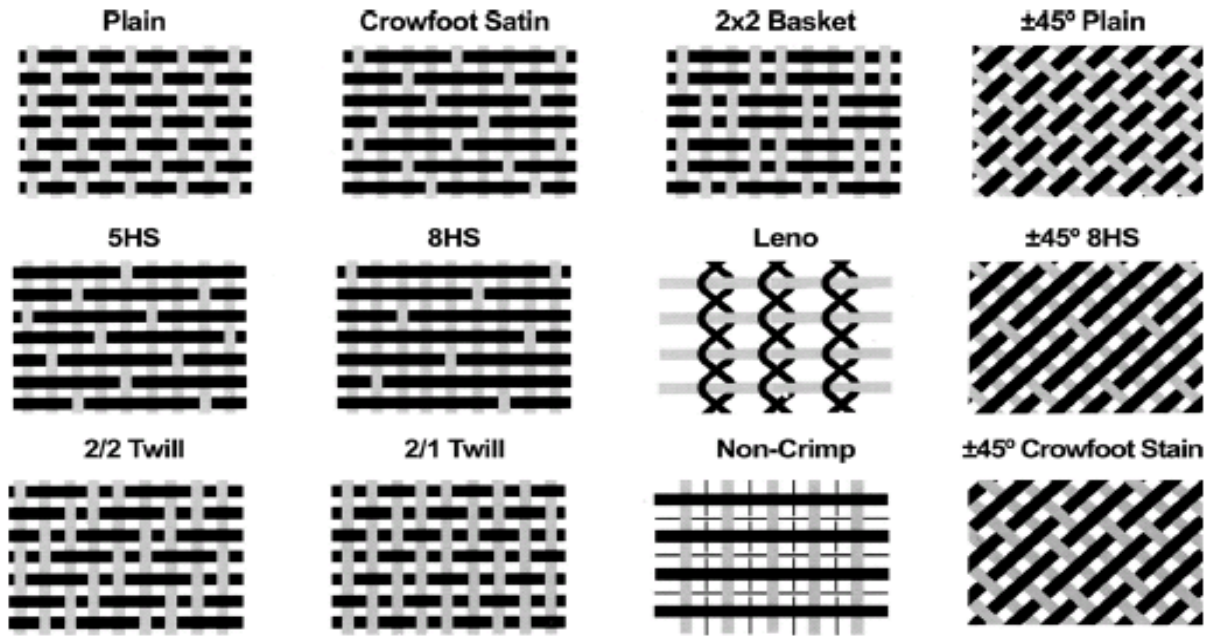
إن أكثر الألياف انتشارا هي الألياف الزجاجية حيث إنها رخيصة الثمن وذات متانة جيدة وتتدرج الى أنواع حسب خواصها وأهم هذه الأنواع: E–glass، S–glass، S2–glass وأما الألياف الكربونية فهي تتدرج في متانتها على مجال واسع حسب التطبيق المطلوب، والجدول رقم (٤,٢) يوضح الخواص الميكانيكية لبعض الألياف الشهيرة.

الجدول رقم (٤,٢): خواص الألياف

Fibre	Density (g/cm^3)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
Flax	1.5	345-1500	27.6	2.7-3.2
Hemp	1.47	690	70	1.6
Jute	1.3	393-800	13-26.5	1.16-1.5
Kenaf	1.22-1.44	930	53	1.6
Ramie	1.55	400-938	61.4-128	1.2-3.8
Sisal	1.45	468-700	9.4-22	3-7
Coir	1.15-1.46	131-220	4-6	15
E-glass (synthetic)	2.55	3400	73	2.5
Kevlar (synthetic)	1.44	3000	60	2.5-3.7
Carbon (synthetic)	1.78	3400-4800	230-240	1.4-1.8

٢-٩- أنواع نسج الألياف

يمكن تحويل الألياف الى نسيج مشابه للنسيج القماشي مما يسهل عمليات التعامل معها وإعطائها الزوايا والتوضع المطلوب، كذلك يمكن التحكم بنسبة عدد الألياف في كل اتجاه من اتجاهات النسيج للوصول الى نسبة متانة أعلى في أحد الاتجاهين، والشكل رقم (٨,٢) يوضح بعض اشكال النسج للألياف.



الشكل رقم (٨,٢): يوضح بعض اشكال النسج.

٢-١٠ أنواع الألياف

تتنوع الألياف الصناعية العضوية المستخدمة في تصنيع المواد المركبة البولميرية التي تعتمد في أساسها على البولميرات، وتعد ألياف الأراميد أكثر الألياف الصناعية العضوية انتشاراً، كما إن ألياف البولي إيثلين تلقى اهتماماً متزايداً حديثاً وسنشرح النوعين السابقين بالتفصيل:

٢-١٠-١ ألياف الأراميد (kevlar)

ألياف بولميرية لها قدرة عالية على امتصاص الطاقة وذات متإنة عالية لذا تستخدم في الغالب لتطبيقات مقاومة الصدم والحماية من المقذوفات كالصفائح المضادة للرصاص، وبسبب كثافتها المنخفضة، فإنها تتمتع بمتانة شد نوعية مرتفعة، مما يجعلها مثالية لتطبيقات الطيارن، ولكنها تعإني من مقاومة منخفضة على الضغط والزحف وحساسية عالية لألشعة فوق البنفسجية (UV) ومقاومة حرارية منخفضة [10] .

تتواجد ألياف الأراميد بشكل تجاري بعدة أسماء ومن أهمها الكيفلار Kevlar و Twaron و Technora تعد ألياف الكيفلار أكثرها انتشاراً، ويمكن وصف ألياف الكيفلار بإنها عبارة عن نايلون مع عدد كبير من حلقات البنزن في سلاسل البوليمير لزيادة الجساءة Stiffness.

تتمتع ألياف الأراميد بخواص حرارية عالية مقارنة مع غيرها من الألياف البوليمرية إذ تبلغ درجة حرارة التحول الزجاجي فيها حوالي ٣٠ درجة مئوية، وهي صعبة الاحتراق ولا تذوب مثل النايلون.

يلاحظ تراجع كبير في خواص ألياف الأراميد عند درجة حرارة 425°C ، يمكن استخدام ألياف الأراميد عند درجة حرارة 300°C لكن لفترات محدودة، وتفقد ألياف الأراميد بعضاً من خواصها عند تعرضها لأشعة الشمس أو الرطوبة، كذلك فإن خواص المتانة بالضغط متدنية.

إن ثبات الأبعاد في ألياف الأراميد جيد نوعاً ما، والخواص الأخرى لألياف الأراميد تتمثل بإنخفاض الناقلية الكهربائية الحرارية وارتفاع السعة الحرارية، هذه الخواص قد يكون لها أهمية كبيرة في بعض التطبيقات.

٢-١٠-٢ ألياف البور

تنتج هذه الألياف بطريقة التوضع الكيميائي لأبخرة البور على سلك ساخن من التنغستين وهذه الطريقة في الإنتاج بطيئة جداً لذلك تعتبر هذه الألياف غالية الثمن، وتتمتع هذه الألياف بخصائص ميكإنيكية ممتازة وتحتفظ بخصائصها الميكانيكية حتى درجات 500°C كما تتمتع بقسأوة عالية ومقاومة عالية على الضغط ولكنها قصفة وضعيفة أمام الصدم.

تعتبر هذه الألياف غالية الثمن بسبب كلفتها العالية عند تصنيعها فهي أقل كلفة من ألياف الكربون، لذا فإنها تستخدم لتطبيقات معينة والتي تتطلب مقاومة حرارية عالية مثل المواد المركبة المستخدمة في المحركلت النفاثة[10].

٢-١٠-٣ ألياف البازلت

تصنف هذه الألياف على إنها ألياف فلزية، حيث تصنع من الصخور البازلتية البركإنية عن طريق الصهر وتشكيل الألياف، وتتمتع ألياف البازلت بخصائص ميكإنيكية أفضل من ألياف الزجاج وثمن أقل من ألياف الكربون وتتمتع باستقراية حرارية ممتازة ومقاومة جيدة للتآكل والمواد الكيميائية، ولا تتأثر بأي نوع من الإشعاعات، ويظهر التوجه حالياً الستعمال هذه الألياف في التطبيقات الحرارية والإنشائية، ويوضح الجدول رقم (٥,٢) الخصائص الميكانيكية لألياف الاراميد والبور والبازلت.

الجدول رقم (٥,٢): الخصائص الميكانيكية لألياف الاراميد والبور والبازلت.

نوع الليف	معامل يونغ Gpa	متانة الشد Gpa	تشوه الكسر %	معامل بواسون –	الكثافة g/cm^3
Kevlar 49	131	3.62	2.8	0.35	1.45
Boron	400	2.7-3.7	0.79	0.2	2.57

Basalt	**89–125**	**4.1–4.8**	**3.15**	**0.2**	**2.6–2.8**

٢–١٠–٤ ألياف البولي إيثلين

تم تصنيع عدد من ألياف البولي إثلين في ثمإنينات القرن الماضي ومنها ألياف سبيكترا (Spectra) و(Dyneem)، وتتمتع ألياف البولي إثلين بكثافة منخفضة جداً تبلغ حوالي $97\ Mg/m^3$ وهذه الكثافة هي أقل كثافة للألياف المستخدمة في المواد المركبة، لذلك فإن خواصها النوعية أعلى من خواص ألياف الأراميد.

درجة إنصهار ألياف البولي إثلين تبلغ حوالي $135°C$ ، كما إنها تملك قابلية كبيرة للزحف عند درجات الحرارة المرتفعة، لذلك فإن درجة حرارة استخدامها محددة عند $100°C$.

٢–١٠–٥ الألياف الزجاجية

يعد الزجاج مادة غير متبلورة وبالتالي ليس هناك أي بنية أو خواص مميزة ويمكن اعتبارها كمادة أيزوتروبية، وله أنواع مختلفة أبرزها زجاج السيلكا، زجاج الأوكسي نيترايد، زجاج الفوسفات والزجاج الهالوجيني.

يعتبر مصهور زجاج السيليكاSiO_2 النوع الممتاز المستخدم بشكل واسع في تصنيع ألياف الزجاج تقوية بإضافة بعض الأكاسيد مثل CaO أو MgO، وهذا النوع بحد ذاته يقسم إلى عدد من الأصناف الفرعية حسب التركيب والخواص ونذكر منها وأشهرها[10]:

- **ألياف الزجاج E (Electric):** تعد الأكثر انتشاراً بين أنواع ألياف الزجاج، تتمتع الألياف المسحوبة حديثاً والمعاملة بحذر بمتانة شد عالية، وتتمتع بعازلية كهربائية ممتازة وخواص ميكإنيكية وكيميائية جيدة وذات سعر منخفض مما يجعلها تستعمل في التطبيقات الكهربائية والتطبيقات الإنشائية منخفضة الكلفة، والبنية الكيمأوية للزجاج E هي $CaO- Al_2O_3–SiO_2$.
- **ألياف الزجاج S (Strength):** البنية الكيمأوية الأساسية لها هي: $SiO_2–Al_2O_3–MgO$ تتمتع بأعلى مقاومة شد ومقاومة تآكل بين ألياف الزجاج ولكنها مرتفعة السعر حيث يصل سعرها إلى ٤ أضعاف سعر النوع E، وتبدي هذه الألياف متانة أعلى من الألياف الزجاجية E كذلك فإن الألياف الزجاجية S قدرة على تحمل والثبات الحراري أعلى من الألياف E، إلا أن من مشاكلها صعوبة تصنيعها والتي تزيد من سعرها مقارنة مع الألياف E.
- **النوع C (Corrosion):** تستعمل في التطبيقات الكيميائية التي تتطلب مقاومة للتآكل.
- **النوع D (Dielectric):** تتمتع بأقل ناقلية كهربائية بين جميع الأنواع وتستعمل في التطبيقات الكهربائية.

- **ألياف السيليكا والكوارتز(R):** تتمتع هذه الألياف بثباتية خصائصها حتى في درجات حرارة تصل إلى $1050^{o}c$، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في فوهات نفث المحركات النفاثة والصاروخية.

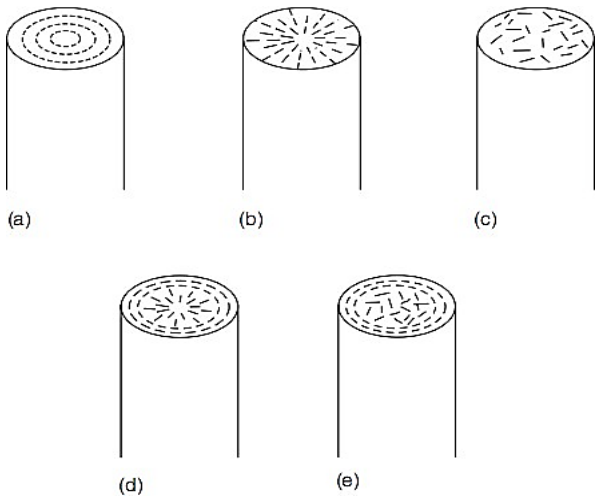
والجدول رقم (٦,٢) يبين بعض الخواص الميكانيكية لبعض أنواع ألياف الزجاج المستخدم في الصناعات.

الجدول رقم (٦,٢): الخواص الميكانيكية لأنواع من ألياف الزجاج.

نوع الليف	معامل يونغ GPa	متانة الشد GPa	تشوه الكسر %	معامل بواسون	الكثافة g/cm3
النوع **E**	**72**	**3.45**	**4.4**	**0.22**	**2.5-2.59**
النوع **S**	**85**	**4.80**	**5.3**	**0.22**	**2.46-2.49**
النوع **R**	**86**	**4.40**	**5.2**	**0.15-0.26**	**2.55**
النوع **C**	**69**	**3.31**	**4.8**	**0.22**	**2.56**
النوع **D**	**55**	**2.50**	**4.7**	**0.22**	**2.14**

٢-١٠-٦ ألياف الكربون

يتم إنتاج ألياف الكربون بشكل كبير على مستوى العالم حيث يبلغ الإنتاج العالمي حوالي 20000 طناً سنوياً، وبالرغم من هذا الإنتاج الكبير إلا إن أسعار ألياف الكربون ما تزال مرتفعة، ويطلق عليها أيضاً ألياف الغرافيت وهي ألياف عالية المتانة ومنخفضة الكثافة وذات مقاومة كيميائية ممتازة. تأتي خصائصها الميكانيكية الممتازة من النظام الذري لذارت الكربون والروابط بينها والذي يشبه النظام الذري في بلورات الغرافيت يجري التحكم بالخصائص الميكانيكية للألياف عن طريق ترتيب سلسلة الكربون على طول الليف، وتتغير هذه الخصائص بحسب المواد الأولية المستعملة وطريقة الصناعة ويوضح الشكل رقم (٩,٢) بعض أنواع توزع سلاسل الكربون على طول الليف.



الشكل رقم(٩,٢): أشكال توزع السلاسل في ألياف الكربون.

تختلف الخواص الميكانيكية كثيراً بين أنواع ألياف الكربون المختلفة، حيث يتم حالياً تطوير أنواع جديدة من ألياف الكربون مثل ألياف الكربون المجوفة وألياف الكربون الملفوفة.

تم تطوير ألياف الكربون المجوفة لدعم المواد البوليمرية وزيادة مقاومة الصدم في حين إن الألياف الملفوفة تستطيع التمدد لأضعاف طولها دون إن تفقد مرونتها.

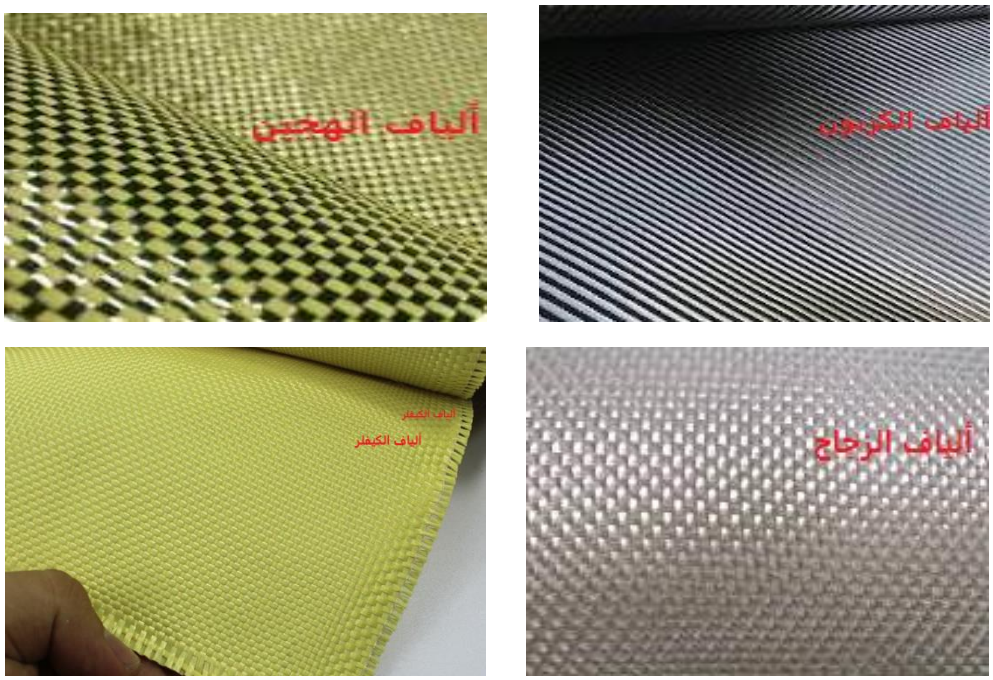
يعد الغرافيت الشكل الأمثل للكربون المستخدم في إنتاج ألياف الكربون إذ يتمتع ببنية شبه بلورية، حيث تتالف بنية الغرافيت من طبقات سداسية مترابطة داخلياً بروابط قوية، تدعى هذه الطبقات بالمستويات الأساسية، كذلك ترتبط المستويات الأساسية مع بعضها بروابط (فاندر فالس) ضعيفة، وإن تموضع المستويات الأساسية بشكل موازٍ لمحأور ألياف الكربون يعطيها المتإنة العالية مع خفة الوزن، ويمكن استخدام الغرافيت عند درجات حرارة تصل إلى 2500°C وذلك بشرط حمايته من الأكسجين، ويعد الكربون من المواد ذات الناقلية الكهربائية الجيدة وقد تعد هذه الخاصية ميزة في بعض التطبيقات في حين قد تكون سيئة في تطبيقات أخرى.

تلعب المواد الأولية وطريقة التصنيع وظروف التصنيع دوراً كبيراً في تحديد الخواص الميكانيكية لألياف الكربون وعلى الرغم من الخصائص العالية أللياف الكربون، إلا إن كلفة التصنيع العالية حد من استعمالها بشكل واسع واقتصر استعمالها في التطبيقات المتقدمة التي تتطلب متإنة عالية كتطبيقات الفضاء والطيران والتطبيقات الرياضية وسيارات السباق ويوضح الجدول رقم (٧,٢) الخصائص الميكانيكية لألياف الكربون، وعند استخدام ألياف الكربون مع راتنج الإيبوكسي فإنها تعطي صفائح ذات خواص ميكانيكية عالية كمقاومة اجهاد التعب مثلا[42].

ويوضح الشكل رقم (١٠,٢) أشكال الألياف الأربعة المستخدمة في بحثنا هذا وهي ألياف الكربون وألياف الزجاج وألياف الكيفلر وألياف الهجين(نسيج بين الكيفلر والكربون).

الجدول رقم (٧,٢) الخصائص الميكانيكية لألياف الكربون.

نوع الليف	معامل يونغ GPa	متانة الشد GPa	تشوه الكسر %	معامل بواسون	الكثافة g/cm3
T1000 (PAN)	294	7.06	2.0	0.2	1.8
HMS4 (PAN)	317	2.34	0.8	0.2	1.8
P55 (Pitch)	379	1.90	0.5	0.2	2.0
P100 (Pitch)	758	2.41	0.3	0.2	2.16



الشكل رقم(١٠,٢): أشكال الألياف.

٢-١١- الخطوات الأساسية لتصنيع المواد المركبة

إن تصنيع المواد المركبة بغض النظر عن طريقة التصنيع يمر بالخطوات الاربع التالية: الترطيب والتنضيد والتماسك والتصليد وسيتم شرح كل خطوة بإيجاز فيما يلي:

- **الترطيب أو التبليل:** في هذه المرحلة يتم مزج الألياف مع الريزين. تختلف أشكال التبليل حسب اختلاف طرق التشكيل، فمثلا في طريقة لف الألياف يتم تمرير الألياف في حمام من الريزين بهدف تبليلها في حين يتم تطبيق الريزين على الطبقات في طريقة التنضيد الرطب وذلك باستخدام مزلجة اسطوانية. تهدف هذه العملية الى ضمإن تغطية الألياف بالريزين بشكل كامل. البارامترات الاساسية المتحكمة بهذه العملية هي اللزوجة والتوتر السطحي والخواص الشعرية.

- **التنضيد:** في هذه الخطوة نقوم بتشكيل طبقات المادة المركبة عبر تشكيل مزيج الألياف والريزين بالاتجاهات المطلوبة (الزوايا) وفي الاماكن والنقاط المرغوبة. نقوم بتشكيل السماكة المطلوبة عبر بناء وتنضيد الطبقات فوق بعضها وذلك للوصول الى الحد المناسب، والهدف الاساسي لهذه الخطوة هو هندسة الألياف وتوزيعها بالشكل الذي تم اعتماده في مرحلة التصميم، وبالطبع فإن أداء المادة المركبة يعتمد الى حد كبير على هذه الخطوة بشكل خاص وذلك حسب توزيع واتجاه الألياف والطبقات.

- **التماسك وطرد الفقاعات:** في هذه الخطوة يتم تحقيق التماسك بين الطبقات المختلفة للمادة المركبة. تؤمن هذه الخطوة طرد الهواء المحتجز بين الطبقات من الخطوات السابقة. إن اتمام هذه الخطوة بشكل جيد ينعكس على جودة القطعة حيث إن عدم تنفيذها بالجودة الكافية يؤدي الى ظهور الفقاعات والفراغات، تتم عملية طرد الفقاعات عبر تطبيق ضغط تدريجي على الطبقات يسأهم في املاء الريزين وسيولته مما يدفع بالفقاعات الى الخروج.

- **التصليد:** تعد عملية التصليد المرحلة الاخيرة من مراحل التصنيع، يمكن للتصليد إن يتم خلال نصف دقيقة كما في حالة الريزينات المتلدنة بالحرارة، كما قد يستغرق ١٢٠ دقيقة للمواد المتصلبة بالحرارة وفي هذه الحالة تعتمد درجة التصليد على نوع المادة ودرجة استشفاء الريزين، وبشكل عام فإن زيادة درجة الحرارة يؤدي الى زيادة نسبة التشابك (الاستشفاء) في حين تتطلب المواد المتلدنة بالحرارة خفض درجة الحرارة للحصول على التصليد المطلوب.

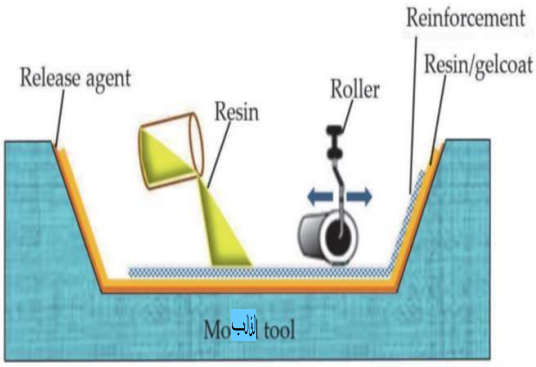
٢-١٢ طرق تصنيع المواد المركبة

هناك عدة طرائق لتصنيع المواد المركبة. ويعتمد اختيار طريقة تصنيع المنتج على المواد والتصميم والأداء والاستخدام النهائي أو التطبيق ونذكر منها[7]:

٢-١٢-١ طريقة القالب المفتوح (Open Contact Moudling)

يجري إشباع الألياف بالراتنج يدويا، وتكون على شكل أقمشة منسوجة أو محبوكة أو مخيطة أو مرتبطة، وفي هذه الطريقة يعالج القالب أولا بمواد مانعة للإلتصاق، وتوضع الألياف الجافة على القالب، ثم يسكب الراتنج السائل وينتشر على طبقات الألياف، ويتحقق ذلك عادة عن طريق، إما البكرات، أو الفرشاة التي تقوم بتبليل الألياف، وإزالة الهواء المحتبس في الطبقات.

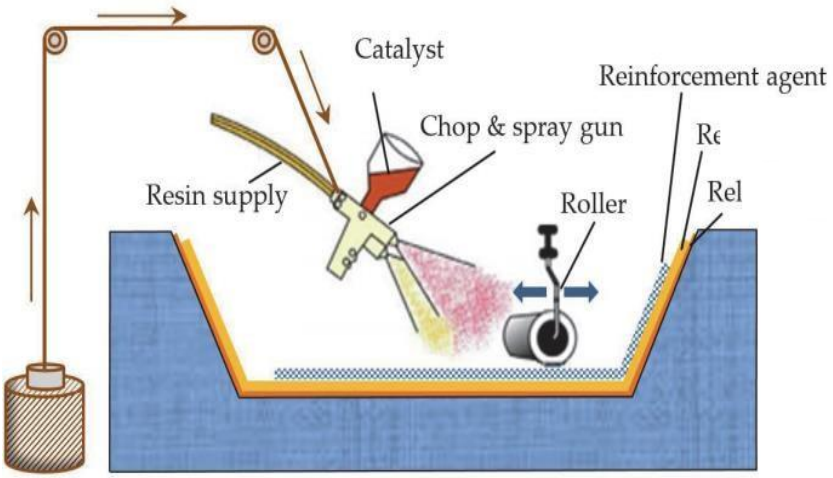
تبلل طبقات قليلة من الألياف، وتترك لتتم عملية المعالجة (التقسية) في شروط محيطية نظامية وبعد إنتهاء المعالجة لهذه الطبقات يجري نزعها عن القالب والشكل رقم (١١,٢) يوضح العمل بهذه الطريقة.



الشكل رقم (١١,٢): طريقة القالب المفتوح[7]

يمكن أن نبدل هذه الطريقة بطريقة الرش وهي طريقة مباشرة لتشكيل المواد المركبة، وفي هذه الطريقة، يعالج القالب أولا بمواد مانعة لاللتصاق، إذا استعملت طبقة هالمية من الراتنج، يجري تطبيقه بالرش في القالب بسماكة معينة بعد وضع المواد المانعة لاللتصاق، ويكون القالب جاهزاللمعالجة.

يتم رش الألياف والراتنج مع مواد التقسية عند لزوجة ١٠٠٠-٥٠٠ سنتي بواز في القالب باستخدام مسدس رش يقطع الألياف المستمرة إلى أطوال حزم قصيرة، ثم ينفخها مباشرة في تيار الراتنج، بحيث يحدث تطبيق كلتا المادتين في وقت واحد على سطح القالب، وفي خطوة أخيرة من عملية الرش، يجري ضغط الصفائح يدوياً باستخدام بكرات. ثم تتم معالجة (تقسية) المادة المركبة وإزالتها من القالب كما في الشكل رقم (١٢,٢) الذي يوضح طريقة العمل بالرش.



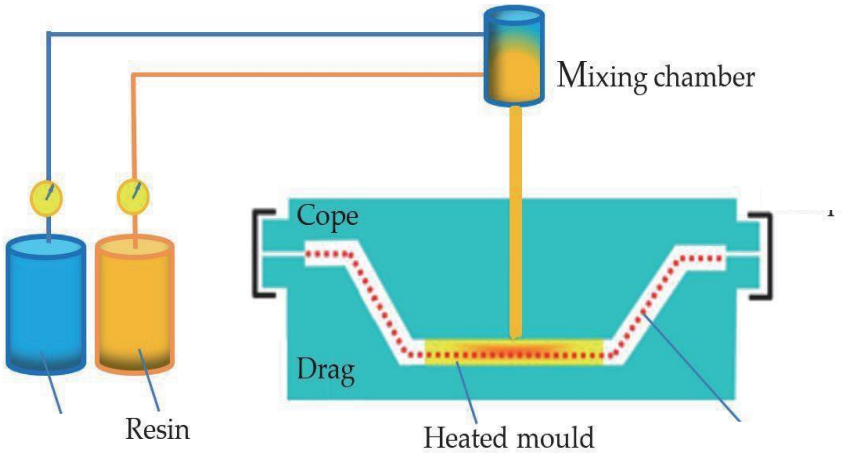
الشكل رقم (١٢,٢): طريقة رش القالب بمسدس الرش

تعد طريقة القالب المفتوح شائعة لتصنيع منتجات المواد المركبة المقواة بالألياف مثل أحواض الاستحمام، وأجسام القوارب، والمصدات، وكبائن الشاحنات، وغيرها من الأشكال الكبيرة وغير المعقدة نسبيا، يُبين الشكل(١٣,٢) تطبيقات طريقة القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش.

الشكل(١٣,٢): تطبيقات طريقة الرش بمسدس الرش

٢-١٢-٢ طريقة القولبة بإنتقال الريزين RTM (Resin Moldling Transfer)

تعتبر القولبة بإنتقال الريزين، التي تسمى أحيانا بالقولبة السائلة، عملية بسيطة إلى حد ما، ففي هذه التقنية، يعالج القالب أولا بالمواد المانعة لالتصاق، ثم توضع مواد التقوية الجافة التي تأخذ شكالا محددا في القالب الذي يغلق بعد ذلك، يبين الشكل(١٤,٢) طريقة القولبة بالإنتقال.



الشكل(١٤,٢): طريقة الإنتقال بالريزين[7]

يتم ضبط كمية الراتنج والمحفز منخفض اللزوجة وخلطهما، ثم ضخهما في القالب تحت ضغط منخفض إلى متوسط من خلال منافذ الحقن، باتباع مسارات محددة مسبقا، يستخدم الراتنج منخفض اللزوجة في طريقة القولبة بالإنتقال ضمان تغلغله بسرعة بين الألياف خلال القولبة، وبشكل كامل قبل التصلب، خاصة مع المواد المركبة ذات السماكة العالية .

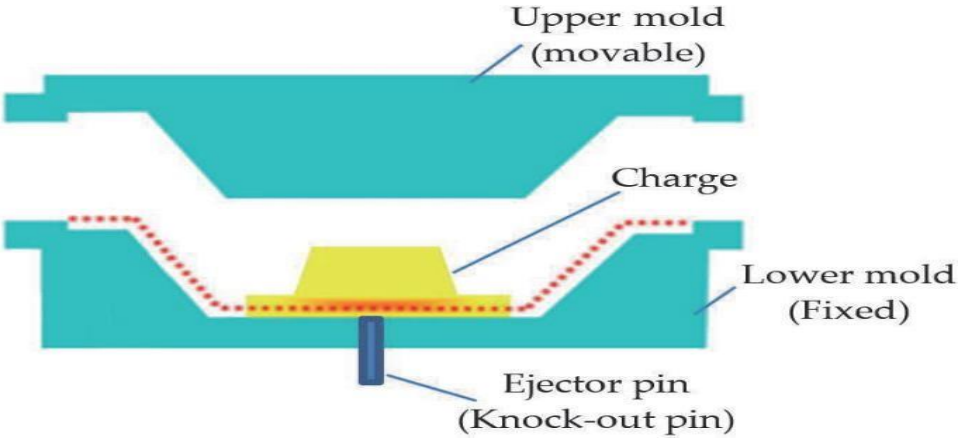
تستخدم هذه الطريقة في الحصول على منتجات ذات أشكال معقدة مثل بعض أجزاء هياكل السيارات وهذا ما يوضحه الشكل رقم (١٥,٢) منتجات مشكلة بطريقة القولبة بالإنتقال.

الشكل(١٥,٢): منتجات طريقة القولبة بإنتقال الريزين

٢-١٢-٣ القولبة بالضغط (Compression molding)

القولبة بالضغط هي عملية دقيقة وسريعة نسبيا لإنتاج أجزاء ذات جودة عالية مصنوعة من مواد مركبة ذات مجال واسع من الأحجام، حيث توضع المواد يدويا أو آليا ضمن القالب، ثم يغلق نصفا القالب، ويطبق الضغط باستخدام مكابس هيدروليكية.

يتراوح وقت الدورة حسب أبعاد القطعة وسماكتها، تنتج هذه العملية أجزاء معقدة عالية المقاومة وذات أحجام متنوعة، يبين الشكل(١٦,٢) القولبة بالضغط.

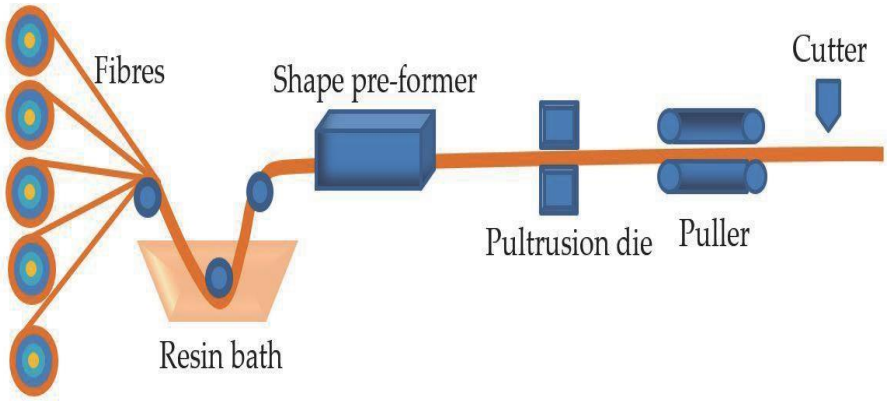


الشكل(١٦,٢): طريقة القولبة بالضغط

٢-١٢-٤ طريقة القولبة بالسحب(Pultrusion method)

هي طريقة تشكيل لإنتاج أطوال مستمرة من هياكل مصنعة من مواد مركبة ذات مقاطع عرضية ثابتة، وهي طريقة تصنيع مستمرة يمكن تكون مؤتمتة بشكل كامل، وفي هذه الطريقة، يتم سحب حزمة مستمرة من الألياف الجافة من خلال محطة تبليل بالراتنج الساخن.

تسحب حزمة الألياف المشبعة إلى قوالب ساخنة، ويتشكل شكل المقطع العرضي للألياف المسحوبة بواسطة هذه القوالب. ثم يعالج الراتنج والألياف حراريا، وتتشكل المادة المركبة. وتقطع المنتجات المستمرة الطويلة المعالجة وفقا للأطوال المرغوبة، ويبين الشكل(١٧,٢) القولبة بالسحب.



الشكل(١٧,٢): طريقة القولبة بالسحب

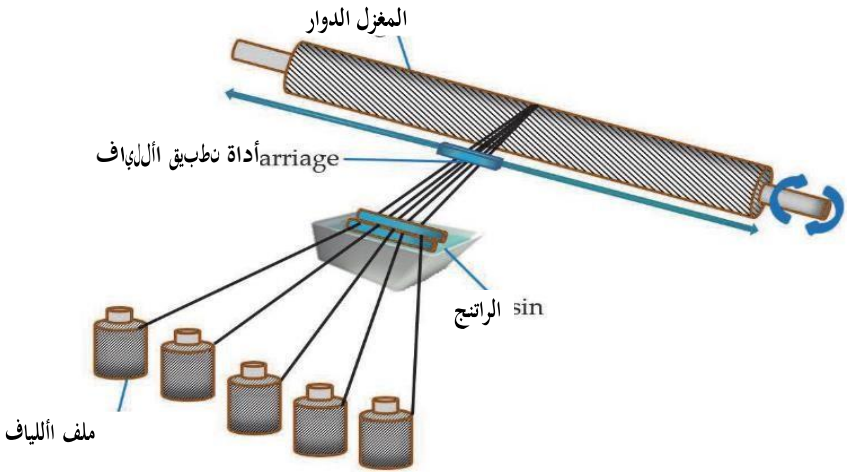
تقتصر هذه الطريقة على إنتاج الأجزاء المستقيمة ذات المقطع العرضي الثابت، مثل الجوائز ذات المقطع I أو ذات المقطع T أومقاطع الإطارات وقضبإن السااللم والشكل(١٨,٢) يبين بعض منتجات هذه الطريقة.

الشكل(١٨,٢): بعض منتجات طريقة القولبة بالسحب

٢-١٢-٥ طريقة اللف الآلي (لف الألياف Filament winding)

اللف الآلي هو طريقة تصنيع مستمرة يمكن إن تكون مؤتمتة بشكل كامل وقابلة للتكرار، مع تكاليف مواد منخفضة نسبيا، حيث يجري تعليق أداة أسطوانية طويلة تسمى المغزل أفقيا بين دعامات النهاية، وتمر الألياف الجافة من خلال حوض من الراتنج ليتم تبليلها، وتتحرك أداة تطبيق الألياف ذهابا وإيابا على طول المغزل الدوار مع عربة النقل، مما يم كن من توضع الألياف عليه في تنضيد محدد مسبقا.

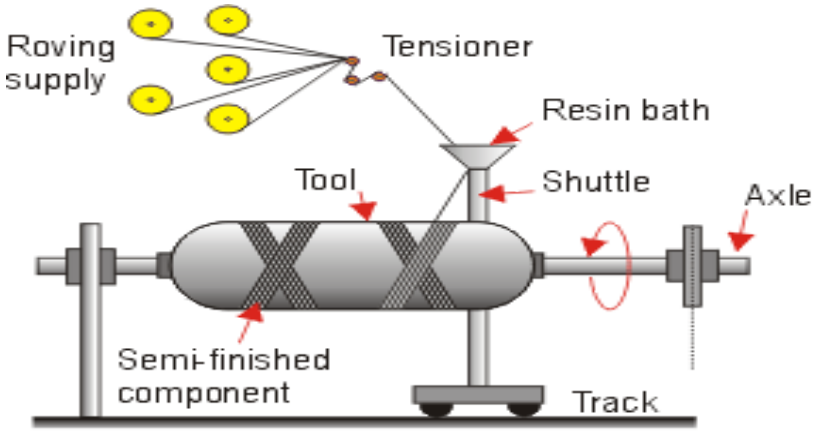
تُستخدم آلة لف الخيوط التي يتم التحكم فيها بواسطة الكمبيوتر لترتيب محأور الحركة وتعتبر هذه الطريقة من الطرائق المستخدمة في تحضير المواد المركبة لتطبيقات الفضاء. يبين الشكل رقم (١٩,٢) اللف الآلي.



الشكل رقم (١٩,٢): طريقة اللف الآلي

٢-١٢-٦ طريقة التشكيل باللف (Filament Winding Process):

تعد طريقة التشكيل باللف أحد أهم طرق تشكيل القطع الاسطوانية المصنوعة من المواد المركبة، وتتمثل الطريقة في مرور الألياف الطويلة المستمرة في حمام من الريزين بحيث تتبلل بالكامل ثم تلف حول محور دوار (شاقة) لتأخذ شكل هذه الشاقة. يمكن التحكم بزوايا ميلإن الألياف من خلال الضبط الدقيق لكل من سرعة دورإن الشاقة وسرعة حركة الألياف عرضيا على الشاقة كما هو موضح في الشكل رقم (٢٠,٢).



الشكل رقم (٢٠,٢) طريقة التشكيل باللف

معظم إنتاج الإنابيب المصنعة من المواد المركبة تتم من خلال هذه الطريقة، ويمكن إن تكون هذه الطريقة مؤتمتة بالكامل ضمان سرعة إنتاج عالية وخفض كلفة الإنتاج، تعد طريقة التشكيل باللف الطريقة الوحيدة لإنتاج بعض القطع الخاصة كالإنابيب والأدوات المعرضة لضغط عال، أهم القطع التي تصنع بهذه الطريقة هي صنارة صيد السمك و مضارب الغولف، وتتميز منتجات هذه الطريقة بجودة إنهائها حيث إنها غالبا لا تحتاج الى عمليات إنهاء لاحقة.

٢-١٣ اختيار عملية التصنيع المناسبة

تعد عملية اختيار طريقة تصنيع المواد المركبة أحد أكبر التحديات التي تواجه مهندسي التصميم والتصنيع، وذلك للتنوع الكبير في الطرق واختلافها حسب نوع المواد الأولية الداخلة في عملية التصنيع. سنستعرض فيمايلي أهم الأسس التي يتم من خلالها اختيار العملية المناسبة للتصنيع، وهذه الأسس هي:

- **الحجم والسرعة في الإنتاج:** تختلف عملية اختيار طريقة تصنيع المواد المركبة حسب التطبيق المطلوب، ففي تطبيقات صناعة السيارات على سبيل المثال نحتاج الى طرق ذات قدرات كبيرة وسرعات عالية قد تصل الى ٥٠٠٠٠٠٠ قطعة بالسنة (٢٠٠٠٠ قطعة باليوم) في حين إن متطلبات الإنتاج للصناعات الفضائية قد لاتتجأوز ١٠ – ١٠٠ قطعة بالسنة.

إن عمليات التصنيع تختلف حسب قدرتها على إنتاج الكميات المطلوبة من القطع، فلا يمكن استخدام عمليات التنضيد اليدوي أو عمليات التنضيد الرطب في إنتاج القطع بمعدلات عالية، في حين تلبي عمليات القولبة بالضغط أو القولبة بالحقن متطلبات الإنتاج الكمي السريع.

- **الكلفة:** تلعب كلفة التصنيع دورا كبيرا في تحديد الطريقة الإنسب لإنتاج القطع. إن العوامل الأساسية التي تؤثر على الكلفة هي: الأدوات، العمال، المواد الأولية، زمن دورة التصنيع وزمن التجميع. إن التحكم بكلفة التصنيع أمر غير بسيط وهو يتصل اتصالا مباشرا بكمية الإنتاج المتوقعة. فمثلا تعد طريقة القولبة بالضغط أقل كلفة من عملية التشكيل بالقوالب الفولاذية وذلك في تصنيع لوحات السيارات بمعدلات لا تتجأوز ١٥٠٠٠٠ قطعة بالسنة، إلا إن عملية التشكيل بالقوالب الفولاذية تصبح أقل كلفة لمعدلات الإنتاج الأعلى.
- **الأداء:** إن المتانة المطلوبة من القطع تحدد الطريقة الإنسب لتصنيعها إذ إن أداء ومتانة القطع يتعلق بشكل مباشر بنوع الألياف وطولها وتوجيهها بالاضافة الى نسبة الألياف الى المادة الرابطة (تعد النسبة من ٦٠ الى ٧٠% النسبة الافضل عمليا). وبالتالي يتم اختيار المواد الأولية وطريقة التصنيع لتلبية متطلبات الاداء المتوقع.
- **الشكل:** يعد شكل القطع المراد تصنيعها عاملا إضافيا يشارك أيضا في اختيار طريقة التصنيع، فمثلا تعد عملية لف الألياف العملية الإنسب لتصنيع إنابيب الضغط والأشكال الاسطوانية، في حين تستخدم عملية البثق مع السحب أكثر اقتصادية لإنتاج القطع الطويلة ذات المقطع المنتظم.

٢-١٦ طريقة العناصر المنتهية

العناصر المنتهية طريقة عددية خاصة بإيجاد حلول تقريبية لمسائل هندسية مرتبطة بظواهر فيزيائية عديدة مثل انتشار الحرارة والصوت وحركة الموائع وحصول التشوهات الإنشائية نتيجة التحميل[٣٣].

إن الاستثمار الجيد لبرامج العناصر المنتهية لا يتطلب فهماً تفصيلياً للرياضيات الخاصة بنظرية العناصر المنتهية، بل يستلزم القدرة على وضع نماذج تقريبية معبرة إلى أبعد حد ممكن عن الظاهرة الفيزيائية المطلوب معالجتها. من الطبيعي إن تشتمل عملية وضع النماذج على مقاربات وافْتِرَاضَات متعددة، ومن الطبيعي إن مايمكن إن يعتمد عند معالجة مسألة معينة يختلف باختلاف المستثمر، ما يعني إن النتائج المستخلصة لمسألة ما قد تعتمد بدقتها وشموليتها على خبرة المستثمر من جهة، وعلى قدرته على فهم الظاهرة الفيزيائية المرتبطة بالمسألة قيد المعالجة من جهة أخرى. دفعت هذه الحقيقة خبراء العناصر المنتهية للتنبيه إلى ضرورة العمل على تقييم النماذج وتحليل النتائج قبل الاعتماد. كما دفعتهم أيضاً لوضع بعض منهجيات العمل Guide Lines وبعض مرجعيات الاختبار، ما يمكن من تقييم النتائج

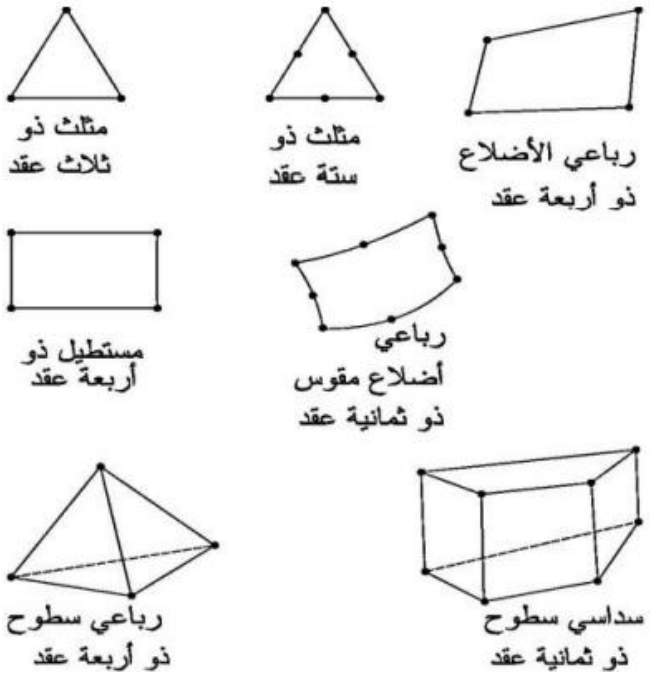
بدقة ومن أهم المسائل والتطبيقات والمشاكل التي يتم معالجتها في هذه الطريقة هي صناعة الأجنحة والحسابات المتعلقة فيها[38].

٢-١٦-١ خطوات تطبيق طريقة العناصر المنتهية

يطور نموذج العناصر المنتهية الممثل لمسألة ما بتسلسل معروف بالتسمية Model development بالعادة، ينفذ هذا التسلسل من خلال تطبيق الخطوات التالية تطبيقاً متكرراً حتى الوصول لنموذج مثبت Verified model، أي نموذج يسمح بالوصول لنتائج صحيحه للمسألة المطروحة.

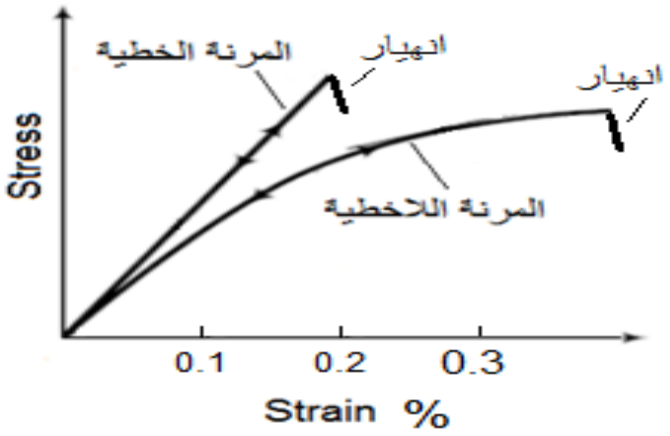
- بناء نموذج مجسم Solid model للكتلة المطلوب معالجتها أو استيراده، مع الإنتباه إلى تضمين ذلك النموذج للتفاصيل الشكلية والبعدية الكافية للتعبير الدقيق عن الواقع.

- اختيار نوع العنصر Element Type فإن برامج العناصر المنتهية توفر مكتبات عناصر منتهية متكاملة، وفقاً لما هو مبين في الشكل رقم(٢١,٢)، ما يتيح للمستثمر إمكانية اختيار العنصر المناسب في قدرته على محاكاة المسألة المطلوب حلها. وتبرز قوة العنصر في قدرته على محاكاة مسألة ما من خلال حالتين، الأولى شكلية، وتوفر المكتبات عناصر أحادية، ثنائية وثلاثية الأبعاد، أما الثانية فوظيفية، وتوفر تلك البرامج عناصر مناسبة للحلول الإنشائية والحرارية والمغناطيسية وغيرها.



الشكل رقم(٢١,٢): نماذج عن العناصر المستخدمة في طريقة العناصر المنتهية[5]

تحديد سلوك المادة أو المواد الداخلة بتركيب الكتلة المطلوب معالجتها، من خلال اختيار نماذج مواد Material models معبرة عن السلوك الفعلي للمواد المستعملة ويوضح الشكل رقم (٢٢,٢) أنماط السلوك.



الشكل رقم (٢٢,٢): إنماط السلوك للمواد[6]

- توليد شبكة العناصر المنتهية Mesh Generation من خلال تقسيم المجسم إلى عدد مناسب من العناصر التي تتصل مع بعضها البعض بعقد Nods، ويجري الوصول لذلك من خلال التعليمات الخاصة بالتوليد الآلي لشبكة العناصر Auto Meshing.
- تطبيق الحمولات والشروط الحدية المناسبة على نموذج العناصر المنتهية الناتج عن الخطوة السابقة. هذه الخطوة قد تكون إشكالية بعدد من المسائل المطروحة، ما يعني إن الحاجة قد تكون قائمة لاختبار عدد من الاحتمالات المتاحة وفقاً للتقريب المعتمد للوضع القائم فعلياً.
- تنفيذ الاختبارات العددية اللازمة للتأكد من جاهزية النموذج للحل، وفقاً للتفاصيل المدرجة بالفقرة اللاحقة، وتعديل النموذج بناءً على النتائج، بهدف التخلص من الأخطاء الناتجة عن بعض الجوانب المتعلقة بتقانة العناصر المنتهية.
- تنفيذ الحل بعد ضبط المتغيرات المتعلقة باختيار إجرائية الحل وتحديد النتائج المطلوب تحصيلها.
- استعراض النتائج وتقييمها من خلال المقارنة مع نتائج مكافئة مأخوذة من حل رياضي مثبت، أو من خلال المقارنة مع نتائج تجريبية معتمدة.

٢-١٦-٢ برنامج العناصر المنتهية Ansys

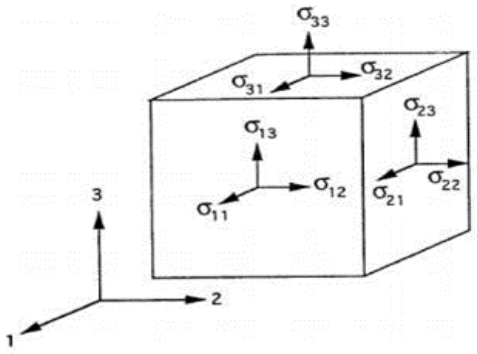
جرى ضمن سياق العمل بالبحث الحالي استعمال برنامج العناصر المنتهية Ansys workbench 19.0، وهو برنامج احترافي مستخدم على نطاق واسع في المجالين الأكاديمي والصناعي، جُهِّز البرنامج بواجهات تخاطبيه توفر عدداً كبيراً من أدوات الرسم والنمذجة والتعديل، بما يُمكِّن من تطبيق الخطوات اللازمة لبناء النماذج وتقطيعها إلى عناصر وتعديل التفاصيل القائمة بسهولة وفاعلية كبيرة.

تسمح الإمكإنيات الرياضية المتقدمة الموجودة في البرنامج بحل مسائل متعلقة بحقول مستقرة (المسائل الخاصة بالإجهادات الناتجة عن حمولات ستاتيكيه مثلاً) أو عابره (المسائل الخاصة بالإجهادات الناتجة عن حمولات سريعة التغيير مثلاً).

تشتمل مكتبة العناصر التي يتضمنها البرنامج على عناصر مناسبة لنمذجة التفاصيل الشكلية المختلفة المرتبطة بظواهر فيزيائية تشتمل على الحقول الحرارية والكهرومغناطيسية والصوتية إضافة إلى حقول الجريإنات و الإجهادات. ولإن مكتبة العناصر المدمجة ضمن البرنامج واسعة، رغم شمولية المكتبة الخاصة بهذا البرنامج إلا إنه هنالك العديد من المواد التي يتدخل في تركيبها أكثر من مادة، لاتتواجد في مكتبته، لذلك قمنا في هذا البحث بتعريف مواد جديدة وإضافتها غلى المكتبة وإدخال خواصها من خلال استنتاحها من الاختبارات العملية واستخدام معادلات حسابية خاصة لحسابها أيضا.

٢-١٧ السلوك الميكإنيكي للمولد المركبة

يوضح الشكل رقم (٢٣,٢) عنصر حجمي مستمر لمادة غير متماثلة المناحي معرض لتركيبة إجهادات، يتم حساب التشوهات الناتجة عن هذه الإجهادات إنطالقاً من قإنون هوك العام والذي يوضح العلاقة بين الإجهاد والتشوه، ويمكن كتابته وفق ترميز نيوتن أو على شكل مورت، كما في المعادلتين (٢-١) و (٢-٢)[11]



الشكل رقم (٢٣,٢): عنصر حجمي خاضع للإجهادات الرئيسية

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{31}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16}\\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26}\\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36}\\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46}\\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56}\\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{31}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} \quad \text{or } \sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j \qquad (١-٢)$$

حيث i،j=1،....،6

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{31}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16}\\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26}\\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36}\\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46}\\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56}\\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{31}\\ \tau_{12}\end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j \qquad (٢-٢)$$

حيث σi الإجهادات التي يتعرض لها العنصر، εj الانفعالات التي يتعرض لها العنصر، Cij مصفوفة الجساءة، Sij مصفوفة المطأوعة وتسأوي مقلوب مصفوفة الجساءة.

من أجل المواد المرنة، يجب أخذ طاقة التشوه بعين االعتبار، فمن أجل تشوهات متناهية الصغر dεi ، تكون طاقة التشوه dW في واحدة الحجم في الجسم[11]:

$$dW = \sigma_i . d\varepsilon_i \qquad (٣-٢)$$

ومن علاقة الإجهاد بالتشوه في المعادلة (١-٢)، تصبح طاقة التشوه:

$$dW = C_{ij}\varepsilon_j . d\varepsilon_i \qquad (٤-٢)$$

$$W = \frac{1}{2} C_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j \qquad (٥-٢)$$

وبالاشتقاق الجزئي مرتين للمعادلة (٥-٢)، ينتج:

$$\frac{d^2W}{d\varepsilon_i d\varepsilon_j} = C_{ij} \qquad (٦-٢)$$

أو

$$\frac{d^2W}{d\varepsilon_j d\varepsilon_i} = C_{ji} \qquad (٢-٧)$$

وبما إن ترتيب الاشتقاق لا يؤثر، فإن Cij=Cji و .Sij=Sji وبذلك، تصبح مصفوفتا الجساءة والمطأوعة متناظرتين، ويتم تخفيض عدد الثوابت إلى ٢١ بدالً من ٣٦، وتصبح المعادلتإن (٢-١) و (٢-٢) [11] كما يلي:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & Sym. & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \qquad (٢-٨)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & Sym. & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \qquad (٢-٩)$$

في حالة المواد ثنائية تماثل المناحي Orthotropic، يوجد مستويين متعامدين للتناظر (كما هو الحال في طبقات المواد المركبة)، يتم تخفيض ثوابت مصفوفة الجساءة ومصفوفة المطأوعة إلى ٩، وتصبح المعادلتإن (٢-٨) و (٢-٩) على الشكل التالي[11]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & Sym. & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \qquad (٢-١٠)$$

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{31}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0\\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0\\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0\\ & & & S_{44} & 0 & 0\\ & Sym. & & & S_{55} & 0\\ & & & & & S_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{31}\\ \tau_{12}\end{bmatrix} \qquad (٢-١١)$$

تستعمل الثوابت في مصفوفة الجساءة والمطأوعة في الدراسات الأكاديمية فقط، أما في التطبيقات الهندسية الميكانيكية، فيجري استبدال هذه الثوابت بالثوابت الميكانيكية التي يتم الحصول عليها بطريقة نصف تجريبية، وهذه الثوابت هي E معامل يونغ، و V معامل بواسون ، و G معامل القص ، وتصبح المعادلتإن (٢-١٠) و (٢-١١) [11]على الشكل التالي:

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{31}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{31}\\ \tau_{12}\end{bmatrix} \qquad (٢-١٢)$$

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{31}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{12}+\nu_{13}\nu_{32}}{E_1E_3\Delta} & \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & 0 & 0 & 0\\ \frac{\nu_{12}+\nu_{13}\nu_{32}}{E_1E_3\Delta} & \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3\Delta} & \frac{\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{13}}{E_1E_2\Delta} & 0 & 0 & 0\\ \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{13}}{E_1E_2\Delta} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1E_2\Delta} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{31}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} \qquad (٢-١٣)$$

$$\Delta = \frac{1}{E_1 E_2 E_3}\begin{vmatrix} 1 & -\nu_{21} & -\nu_{31} \\ -\nu_{12} & 1 & -\nu_{32} \\ -\nu_{13} & -\nu_{23} & 1 \end{vmatrix} \qquad (١٣-٢)$$

في حالة الصفائح الرقيقة، تعتبر حالة إجهادات مستوية، حيث تسأوي الإجهادات$\sigma 3$ و$\tau 23$و $\tau 31$ الصفر وتصبح المعادلات (٢-١٠) و (٢-١١) [11]بالشكل:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \qquad (١٤-٢)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \qquad (١٥-٢)$$

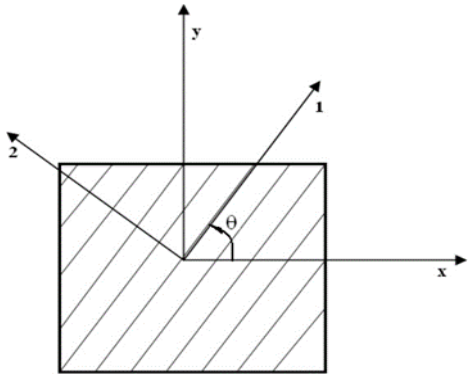
وباستعمال الثوابت الميكانيكية، تكتب المعادلتإن السابقتإن على الشكل[11]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \qquad (١٦-٢)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \qquad (١٧-٢)$$

يكون الفرق في الجساءة في طبقات المواد المركبة بين اتجاه الألياف والاتجاه العرضإني كبير جدا. لذلك، توضع الألياف في الطبقات بشكل يصنع زأوية مع اتجاه تطبيق القوة.

من هنا جرى اعتبار جملتين إحداثيتين الأولى موضعية ذات محور مواز للألياف ومحور عمودي عليها، والثانية عامة ذات محور مواز لاتجاه تطبيق القوة ومحور عمودي عليها، كما يوضح الشكل رقم (٢٤,٢).



الشكل رقم (٢٤,٢): جمل الإحداثيات

وللتحويل بين جملتي الإحداثيات، تستعمل المعادالت التالية:

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=[T]\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \frac{1}{2}\gamma_{12}\end{bmatrix}=[T]\begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \frac{1}{2}\gamma_{xy}\end{bmatrix} \qquad (١٨-٢)$$

حيث

$$[T]=\begin{bmatrix}m^2 & n^2 & 2mn\\ n^2 & m^2 & -2mn\\ -mn & mn & m^2-n^2\end{bmatrix} \quad \text{and} \quad m=Cos\theta\,,\ n=Sin\theta \qquad (١٩-٢)$$

وبهذا نكون قد قدمنا فكرة عامة عن ميكانيك المواد المركبة والذي يعتبر من المواضيع المهمة والصعبة وذلك لان المواد التي يوصفها هي مواد غير متجانسة وتختلف بخواصها حسب طريقة البناء كالتنضيد وزوايا التوجيه وعدد الطبقات وغيرها من الشروط.

٢-١٨ معايير الإنهيار (FAILURE CRITERIA)

عندما نتكلم عن طبيعة الإنهيار في المواد المركبة والتي تتصف بإنها مواد غير متماثلة المناحي (Orthotropic)، فإننا ندخل في مجال واسع ومعقد إلى حد ما بالمقارنة مع المواد المتماثلة المناحي (isotropic). لذلك، لا يمكن استخدام أساليب تحليل معايير الإنهيار في حالة المواد المتجانسة الخواص مثل د ارسة دوائر مور (Mohr's Circle)، حيث من المأكد إن المواد المركبة ذات مقاومة أعلى بكثير في اتجاه الألياف منه في االتجاه العرضإني، لذلك، ليس الإجهاد الأعظمي هو المسبب للإنهيار كما هو موضح بالشكل (٢٥,٢).

في الطبقات وحيدة الاتجاه للمواد المركبة، يبدأ الإنهبار على المستوى الميكروي ويتطور للمستوى المجهري، ومن ثم ينتهي بالانهيار الكلي. ويكون الإنهيار الأولي المجهري وفقاً لأحد الأشكال وهي إما إنهيار الألياف كتقطعها أوتحنيبها الموضعي، أو يكون على شكل إنهيار المادة الرابطة كتشك الشقوق والفجوات، أو على شكل إنهيار السطح البيني كإنفصال الطبقات.

في المواد المركبة، تعتمد مقاومة الصفائح على مقاومة كل طبقة وحيدة الاتجاه، وبالتالي، فإن جميع معايير الانهيار تتعلق بشكل أساسي بمعاملات المقاومة الخمس للطبقة وحيدة الاتجاه وهي:

Xt: مقاومة الشد الأعظمية الطولية (في االتجاه ١).

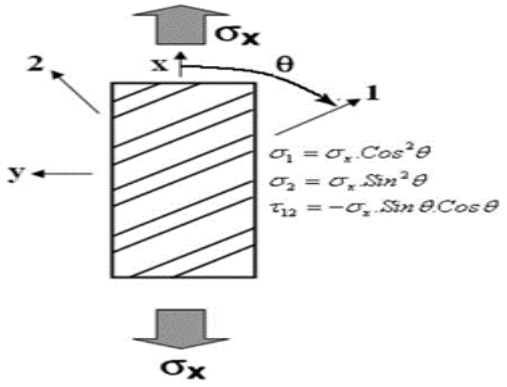
Xc : مقاومة الضغط الأعظمية الطولية.

Yt: مقاومة الشد الأعظمية العرضإنية (في الاتجاه ٢).

Yc: مقاومة الضغط الأعظمية العرضإنية.

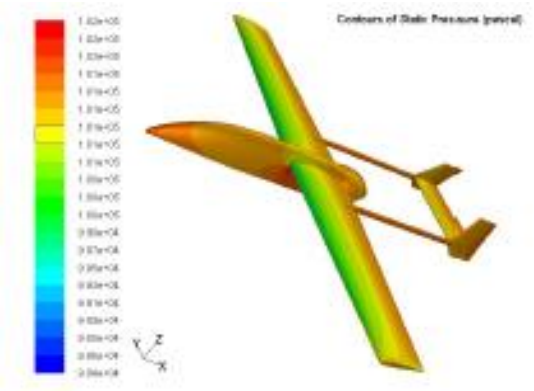
S: مقاومة القص الأعظمية (في المستوي ١-٢)

وتعتمد معايير الإنهيار في حساب معامل الإنهيار e على هذه المعاملات الخمس[11].



الشكل رقم (٢٥,٢): الإجهادات في طبقة الألياف

يتم الاعتماد على طريقة العناصر المنتهية باستخدام برامج التحليل العددي كالبرنامج المستخدم في هذا البحث، في تحليل الانهيار وعلى وجه الخصوص التطبيقات التي تدخل في صناعتها المواد المركبة ونذك من هذه التطبيقات الطيران الحربي وطيران الاستطلاع كما هو موضح في الشكل رقم (٢٦,٢)، [39].



الشكل رقم (٢٦,٢): الإجهادات في طبقة الألياف

٢-١٨-١ معيار الإجهاد الأعظمي (Maximum stress failure Criterion)

في هذا المعيار، يحدث الإنهيار عندما يصبح أحد الإجهادات الأساسية أكبر أو يسأوي الإجهاد الأعظمي للمادة وفق هذا االتجاه، ويمكن إن يعبر عنه رياضياً بالمعادلة:

$$\sigma_1 < X_t \qquad \sigma_2 < Y_t \qquad \sigma_1 > X_c \qquad \sigma_2 > Y_c \qquad |\tau_{12}| < S \qquad (٢٠-٢)$$

وللإنتقال إلى جملة الإحداثيات العامة، تطبق المعادلة:

$$\sigma_1 = \sigma_x Cos^2\theta \qquad \sigma_2 = \sigma_x Sin^2\theta \qquad \tau_{12} = -\sigma_x Sin\theta.Cos\theta \qquad (٢١-٢)$$

بدمج المعادلتين (٢٠-٢) و (٢١-٢)، يصبح معيار الإجهاد الأعظمي:

$$\frac{X_c}{Cos^2\theta} < \sigma_x < \frac{X_t}{Cos^2\theta} \qquad \frac{Y_c}{Sin^2\theta} < \sigma_x < \frac{Y_t}{Sin^2\theta} \qquad |\sigma_x| < \left|\frac{S}{Sin\theta.Cos\theta}\right| \qquad (٢٢-٢)$$

وتمثل هذه المتراجحات معامل الإنهيار e.

٢-١٨-٢ معيار التشوه الأعظمي (Maximum Strain Failure Criterion)

العامل الأساسي في هذا المعيار هو التشوه وفق الاتجاها ت الأساسية في المادة. ويحدث الإنهيار عند تحقق شرط أو أكثر من الشروط التالية:

$$\varepsilon_1 < X_{\varepsilon_t} \qquad \varepsilon_2 < Y_{\varepsilon_t} \qquad \varepsilon_1 > X_{\varepsilon_c} \qquad \varepsilon_2 > Y_{\varepsilon_c} \qquad |\gamma_{12}| < S_\varepsilon \qquad (٢٣-٢)$$

حيث Xεt : التشوه الأعظمي على الشد وفق الاتجاه ١.

Xεc : التشوه الأعظمي على الضغط وفق الاتجاه ١.

Yεt : التشوه الأعظمي على الشد وفق الاتجاه ٢.

Yεc : التشوه الأعظمي على الضغط وفق الاتجاه ٢.

Sε : التشوه الأعظمي على القص في المستوي ١-٢.

يمكن حساب التشوهات وفق الاتجاهات الأساسية في المادة من المعادلات التالية:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \qquad (٢٤-٢)$$

وبتطبيق معادالت التحويل (٢١-٢) بين جمل الإحداثيات، تصبح المعادلات (٢٤-٢) على الشكل:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}\left(Cos^2\theta - \nu_{12}Sin^2\theta\right).\sigma_x$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}\left(Sin^2\theta - \nu_{21}Cos^2\theta\right).\sigma_x$$

$$\gamma_{12} = -\frac{1}{G_{12}}(Sin\theta.Cos\theta).\sigma_x \qquad (٢٥-٢)$$

وبالتالي، يصبح معيار التشوه الأعظمي[11]:

$$\frac{X_c}{Cos^2\theta - \nu_{12}Sin^2\theta} < \sigma_x < \frac{X_t}{Cos^2\theta - \nu_{12}Sin^2\theta}$$

$$\frac{Y_c}{Sin^2\theta - \nu_{21}Cos^2\theta} < \sigma_x < \frac{Y_t}{Sin^2\theta - \nu_{21}Cos^2\theta}$$

$$|\sigma_x| < \left|\frac{S}{Sin\theta.Cos\theta}\right| \qquad (٢٦-٢)$$

٢-١٨-٣ معيار تساي-هيل (Tsai-Hill Failure Criterion)

معيار تساي – هيل هو معيار لإجهاد الخضوع ، وهو مشتق من معيار فون ميسيس(Von Mises) للمواد غير متماثلة المناحي، ويكتب هذا المعيار على الشكل التالي:

$$(G+H)\sigma_1^{\,2}+(F+H)\sigma_2^{\,2}+(F+G)\sigma_3^{\,2}-2H\sigma_1\sigma_2-2G\sigma_1\sigma_3-2F\sigma_2\sigma_3$$
$$+2L\tau_{23}^{\,2}+2M\tau_{13}^{\,2}+2N\tau_{12}^{\,2}=1 \qquad (٢٧-٢)$$

في هذه المعادلة المعاملات M،N،L،F،H،G هي حعاملات مقاومة الإنهيار، وتحسب من معاملات مقاومة المادة وهي S،Y،X عن طريق تطبيق المعادلات التالية:

إذا كإن الإجهاد S هو الوحيد المطبق، يكون (٢٨-٢) $$2N=\frac{1}{S^2}$$

وإذا كإن الإجهاد σ1 هو الوحيد المطبق، يكون (٢٩-٢) $$G+H=\frac{1}{X^2}$$

وإذا كإن الإجهاد σ2 هو الوحيد المطبق، يكون (٣٠-٢) $$F+H=\frac{1}{Y^2}$$

وإذا كإن االجهاد σ3 هو الوحيد المطبق، يكون (٣١-٢) $$F+G=\frac{1}{Z^2}$$

وبتجميع المعادلات (٢٩-٢) و (٣٠-٢) و (٣١-٢) ، تصبح:

$$2G=\frac{1}{X^2}+\frac{1}{Z^2}-\frac{1}{Y^2} \qquad (٣٢-٢)$$

$$2F=\frac{1}{Y^2}+\frac{1}{Z^2}-\frac{1}{X^2} \qquad (٣٣-٢)$$

$$2H=\frac{1}{X^2}+\frac{1}{Y^2}-\frac{1}{Z^2} \qquad (٣٤-٢)$$

في حالة إجهادات مستوية لطبقة مواد مركبة وحيدة اتجاه الألياف، يكون τ32=0 ،τ31= σ3=، ويكون Y=Z بسبب التناظر، وبالتالي، يصبح معيار تساي – هيل من الشكل:

$$\frac{\sigma_1^{\,2}}{X^2}-\frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2}+\frac{\sigma_2^{\,2}}{Y^2}+\frac{\tau_{12}^{\,2}}{S^2}=1 \qquad (٣٥-٢)$$

وتمثل هذه المعادلة معامل الانهيار e.

وبتطبيق معادلات التحويل بين جمل الإحداثيات () يصبح المعيار من الشكل:

$$\frac{Cos^4\theta}{X^2}+\left[\frac{1}{S^2}-\frac{1}{X^2}\right].Cos^2\theta.Sin^2\theta+\frac{Sin^4\theta}{Y^2}=\frac{1}{\sigma_x^{\,2}} \qquad (٣٦-٢)$$

من خلال هذه الفقرة التي تضمنت شرح مفصل عن إنهيار المواد المركبة، أصبح بالإمكان توقع حدوث الإنهيار في هذه الأنواع من المواد من خلال الحسابات والمعادلات والمعايير المذكورة سابقا[11].

الفصل الثالث: الستيريوبور والهياكل المركبة

The Stereopore and composite structures

٣-١- تمهيد (PREFACE) :

في هذا الفصل، والذي يعتبر تكملة للفصل الثإني والدراسة النظرية المتبعة في هذا البحث، حيث عرضنا في الفصل الثاني معلومات نظرية واسعة عن المواد المركبة الولميرية بمكوناتها من الألياف والمادة الرابطة، أما في هذا الفصل سيجري تقديم معلومات نظرية واستنتاجات لخواص وقيم للمادة الأخرى المستخدمة في تكوين المتراكب المدروس' وهذه المادة هي الستريوبور، وتستند تلك الاستنتاجات والقيم إلى اختبارات تستند على مواصفات قياسية عالميه من حيث عينات الاختبار والطريقة المتبعة.

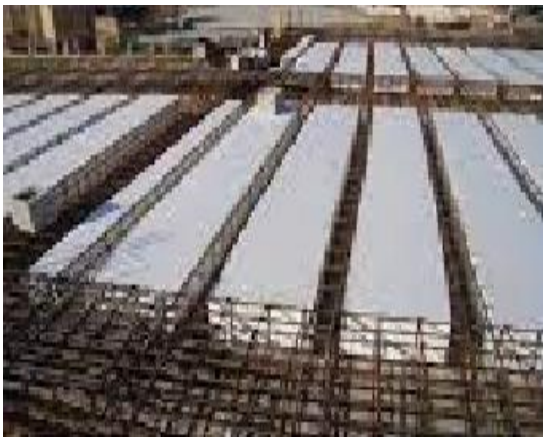
من المهم أيضا عرض معلومات كافية عن المتراكب الناتج والمصنع في ورشتنا المحلية وتقديم جملة من الخواص لهذا المتراكب، وهذا ما جرى أيضا في هذا الفصل، حيث تمت دراسة هذا المركب واستنتاج بعض الخواص سواء من دراسات سابقة أو دراسات مخبرية أو من نتائج تجريبية، وتم أيضا عرض مجموعة دراسات مرجعية تم اعتمادها لإنجاز هذا البحث بالاستفادة من ترتيب أفكارها ومعلوماتها المقدمة والمنشورة ضمنها وتسخيرها في إنجاح هذا البحث.

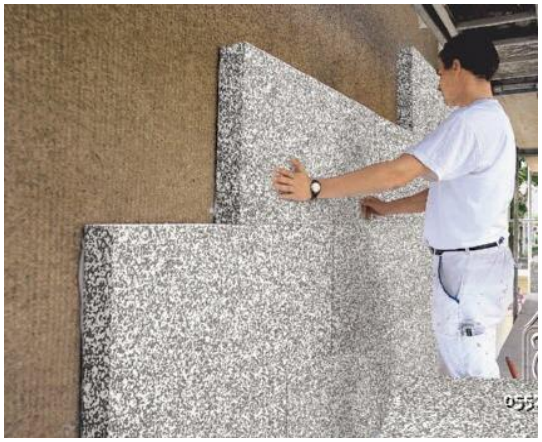
٣-2 مقدمة

تعتبر رغوة البوليسترين الموسعة (EPS) هي مادة رائدة في مجال الهندسة الجيوتقنية وعمرها التشغيلي مشابه لمواد البناء الأخرى، حيث يمكن استخدامه لتعبئة فراغات الجسور والطرق السريعة، علأوة على ذلك ، فقد تم استخدامه كإدراج قابل للضغط خلف الجدران الاستنادية، وفوق خطوط الإنابيب والإنفاق أو المجاري وتحت الألواح أو الحزم في الأساس ويعتبر مادة أساسية في تصنيع خرسانات انشائية خفيفة[40].

البولسترين الموسع هومادة صلبة وخفيفة الوزن من البلاستيك الخلوي البوليميري وتعود الشعبية الواسعة لمواد EPS إلى العديد من خصائصها البارزة، على سبيل المثال مقاومة للماء، عدم قابلة للتحلل، صديقة للبيئة، سهلة النقل والتركيب بسهولة بدون معدات خاصة، قابلة للضغط وغيرها من الخواص التي تجعله يصبح من أهم المواد المستخدمة في الصناعات المحلية والعالمية، ويمكن استخدام خاصة خفة الوزن لمواد EPS لبناء السدود والأرصفة في المناطق الضعيفة التي لاتتحمل بناء جدار إسمنتي فوقها فيتم اللجوء إلى استخدام هذه المادة نظرا لخفة وزنها بالإضافة إلى العزل الجيد كما في الشكل رقم (١,٣).

تنوعت الدراسات التي أجرت على الستايروبور واتسعت في عدة مجالات سواء كيميائية أو فيزيائية أو ميكإنيكية واتصفت بالدراسات الضيقة إلى حد ما كامتصاصه الماء، وقوة الإنضغاط والانحناء، ومعاملات مقاومة القص على الكثافات المنخفضة ل EPS وغيرها من الدراسات وسنذكرها بالتفصيل لاحقا.





الشكل رقم (١,٣): استخدام الفلين في البناء والعزل[12]

٣-٢ أهمية الـ EPS

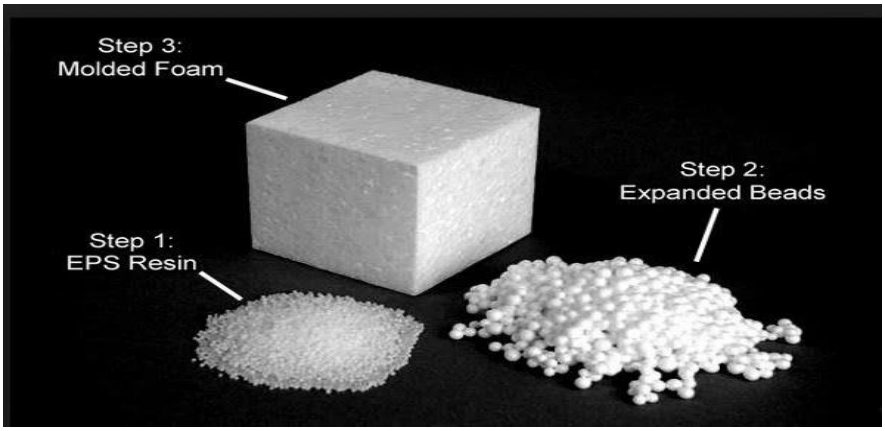
تكمن أهمية هذه الماده نظرا لأهميتها الإقتصادية والتوفير الكبيلر التي تقدمه عند استعمالها بدلا عن مواد أخرى غالية الثمن بالإضافة إلى الكثير من المزايا بكافة أشكالة التي يمكن إن يصنع بها سواءا مكعبات صلبة أو حبيبات خشنة أو مسحوق ويبين الشكل رقم (٣,٣) أشكال الستريوبور، ونذكر من مزايا الستريوبور:

- البوليسترين الموسع هو كتلة أو مواد صلبة من الرغوة البلاستيكية منخفضة الكثافة عند استخدامها كمادة حشو خفيف الوزن أو للعزل الحراري في التطبيقات الجيوتقنية.
- الـ EPSذات الاستخدام الشائع لها كثافة من ١٥ إلى ٣٠ كجم/م٣ لها قوة وصلابة مماثلة للطين المتوسط.
- EPS مادة خفيفة الوزن للغاية مع قوة ضغط جيدة ومقاومة عالية للماء وخصائص توسيد ممتازة وتتأثر معظم هذه الخصائص بكثافة وإنصهار مادة الرغوة المقولبة.
- ينتج عن بنية الخلية المغلقة لـ EPS خصائص عزل ممتازة تظل مستقرة طوال عمر المادة طالما تم تركيب المادة وصيإنتها بشكل صحيح.
- لا تتغير خصائص العزل الخاصة بالرغوة بشكل كبير لدرجات حرارة تصل إلى ١٦٧ درجة فهرنهايت (٧٥ درجة مئوية) تحت التعرض طويل المدى لدرجة الحرارة مع عدم وجود حد لدرجة الحرارة المنخفضة.

- استخدام ال EPS في التطبيقات الهندسة المدنية والبيئية المختلفة مثل السدود والجدرإن الإستنادية والمنحدرات وما إلى ذلك وخاصة في التربة الرخوة جدا، ويستخدم بشكل واسع في صناعة الطائرات المسيرة الحديثة كمادة حشو كما يظهر الشكل رقم (٢,٣) طائرة استطلاعية وقد استخدم الستريوبور كمادة حشو في الجناح.

الشكل رقم (٢,٣): استخدام الستريوبور في الطائرة الاستطلاعية [15]

- في العديد من التطبيقات، يتعرض EPS لأحمال ضاغطة إما من الحمل الإضافي الميت أو الأحمال الحية العابرة.



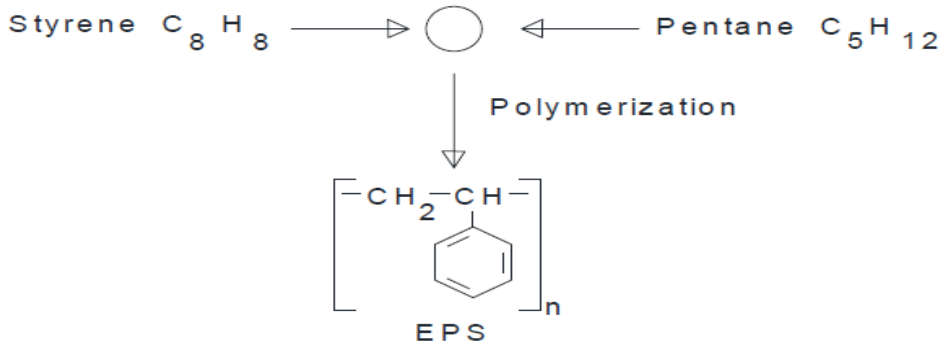
الشكل رقم (٣,٣): أشكال الستريوبور[11]

٣-٣ تصنيع الـ EPS

يتم تصنيع الرغوة ل EPS بواسطة حبيبات البوليسترين التي يتم توسيعها مسبقا والتي يتم تشكيلها ودمجها في قوالب باستخدام بخار جاف مشبع، وبشكل عام، توجد ثلاث مراحل رئيسية في عملية تصنيع الرغوة الأرضية:

- EPS ما قبل الرغوة
- مرحلة الإنضاج
- صب الكتل قبل تقطيعها إلى أبعاد محددة مسبقًا

يتم إنتاج حبيبات البوليسترين نفسها عن طريق بلمرة مونومر ستايرين في معلق مائي، وأثناء عملية البلمرة، يتم امتصاص البنتإن عادة بواسطة حبيبات البوليسترين القابلة للتمدد لتمكين التمدد في مرحلة الإنتاج اللاحقة، فالبنتإن موجود في البترول والستايرين وهو مشتق بترولي وكلأهما عبارة عن هيدروكربونات نقية، أي إنهما يتكونإن فقط من الكربون والهيدروجين، فالبوليسترين القابل للتمدد (EPS) هو نتاج بلمرة أحادي الستيرين بإضافة كمية صغيرة من البنتإن ويوضح الشكل رقم (٤,٣) رسم تخطيطي لممركب الستريوبور[44].



الشكل رقم (٤,٣): شكل تخطيطي الـ [44]EPS

بعد الإنتهاء من البلمرة، يتم فصل الحبيبات عن الماء بالطرد المركزي والتجفيف ثم يتم توزيع حبيبات البوليسترين الجافة القابلة للتمدد حسب حجمها عن طريق الغربلة، ثم يتم تغليف الحبيبات لتحسين عمليات التحويل اللاحقة مثل التوسع والقولبة.

يبلغ متوسط قطر حبيبات راتينج البوليسترين 1mm وحجمها حوالي $0.52mm^3$ ، حيث إن حبيبات الراتنج القابلة للتوسيع هي المواد الخام التي توفرها الشركات الكيميائية لمصنعي الرغوة الأرضية EPS.

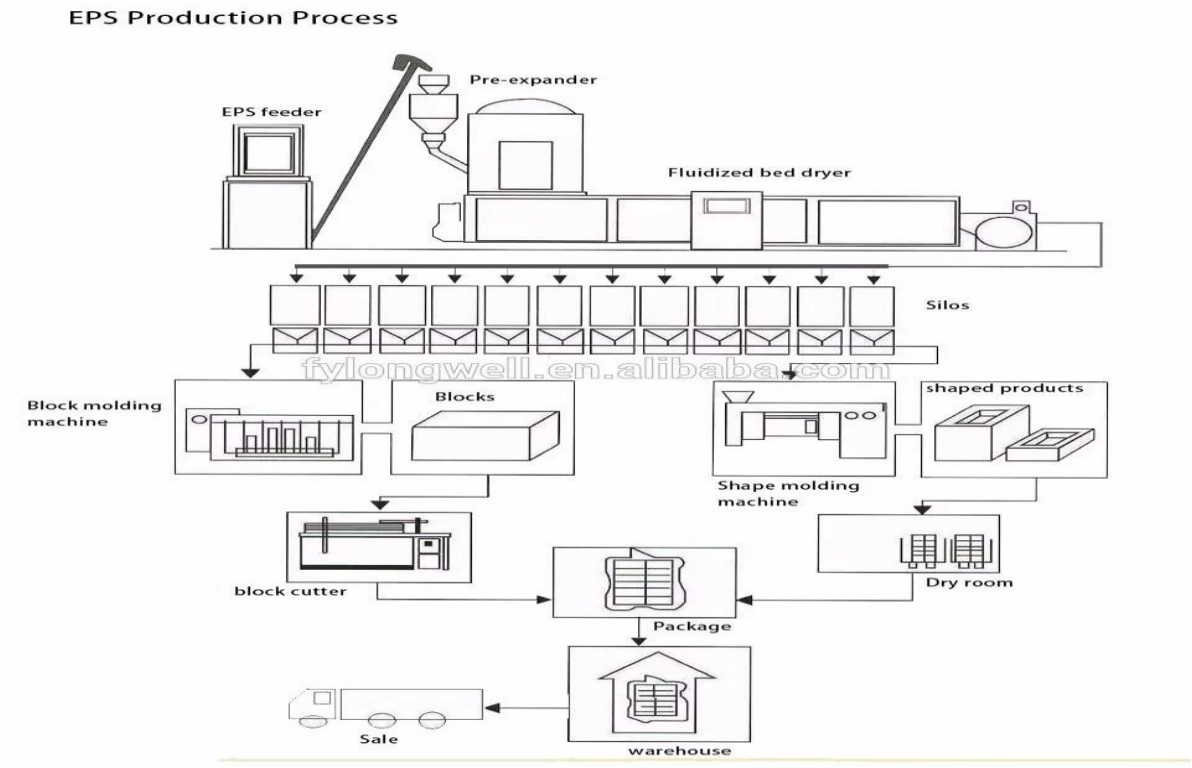
يتم توفير حبيبات الراتينج بدرجات مختلفة لإنتاج الرغأوي لتناسب تطبيقات مختلفة مثل عمليات تشكيل القوالب والأشكال العامة وحأويات مقاومة التسرب ومواد التغليف.

في مصانع الـ EPS، يتم توسيع حبيبات راتينج البوليسترين مسبقا بالبخار عند درجة حرارة حوالي 100درجة مئوية. تتشكل الحبيبات الممددة مسبقا حيث تعمل درجة الحرارة على تليين الحبيبات ويتمدد غاز البنتإن حتى ٥٠ مرة أو أكثر لتكوينها

تتحكم كثافة كتلة الرغوة النهائية بدرجة التمدد ودرجة الحرارة ومدة التعرض للبخار أثناء مرحلة ما قبل الرغوة، فهذه المرحلة يمكن التحكم فيها نسبيا وبالتالي يتم التحكم في كثافة الكتلة بدقة معينة، يتم تبريد الحبيبات التي تم توسيعها مسبقا لتنضج وتستقر.

بعد النضج، وهو الوقت الذي ينتشر فيه الهواء في الخلايا المشكلة حديثا، يتم تشكيل هذه الرغوة المسبقة ودمجها في شكل أو قوالب مرة أخرى تحت تأثير البخار الجاف المشبع، ويمكن تفتيت بعض الكمية من البوليسترين الموسع المعاد تدويره وخلطه معها في هذه المرحلة قبل الصب مباشرة.

الشكل(٥,٣) هو تمثيل تخطيطي لعمليات تصنيع EPS. أحجام المكعبات النموذجية المنتجة والمتاحة تجاريا في الولايات المتحدة هي mm(٠,٦١ × ١,٢٢ × ٢,٤٤).



الشكل رقم (٥,٣): مخطط صندوقي لإنتاج الستريوبور[13]

يتكون الـ EPSمن العديد من الخلايا الدقيقة ذات الشكل السداسي التي تحتوي على الهواء حيث تلعب جدران الخلايا والهواء داخل الخلايا الدقيقة دورا مهما في خصائص هذه المادة، وتعتمد كثافة البولستيرين على نوع حبيبات الراتنج وحجم الحبيبة.

٣-٤ اختبارات ال EPS

تم إجراء عدد من التحقيقات لتقييم الخصائص البارزة لرغوة EPS بما في ذلك الكثافة وقوة الإنضغاط ومعامل المرونة وقوة الخضوع ونسبة بواسون وقوة الإنثناء وقوة الشد وقوة القص وتشوه الزحف والتوصيل الحراري، من بين هذه الخصائص، يتم استخدام الكثافة وقوة الإنضغاط ومعامل المرونة وخصائص الزحف والتوصيل الحراري بشكل شائع في تقييم أداء الرغوة الأرضية EPS في التطبيقات الجيوتقنية المختلفة، باستثناء الموصلية الحرارية.

تم تقييم الخصائص الأخرى عن طريق إجراء اختبارات ضغط غير محصورة على المدى القصير والطويل ومع ذلك، يتم استخدام رغوة جغرافية EPS في المناطق التي قد تكون فيها ظروف التحميل متعددة المحأور، على سبيل المثال قد يؤدي الضغط إلى عمليات تحميل متعددة المحأور من أكثر من جهه.

تم إجراء سلسلة من اختبارات امتصاص الماء وقوة الإنضغاط وقوة الانحناء والكثير من الاختبارات الفيزيائية أو الميكانيكية بغية دراسة سلوك الـ EPSوالتحقق من خواصه الفيزيائية والميكانيكية.

تتوفر المادة الخام من الEPS على شكل مكعبات لذا تم تجهيز العينات بشكل أسطواني ومستطيل ومكعب حيث تم أخذ عينات بأحجام مختلفة من العينات وفقا لمواصفات قياسية عالمية تناسب كل نوع من الاختبارات المختلفة.

٣-٥ الخصائص الفيزيائية والكيميائية للستريوبور

الستريوبور هو مادة بلاستيكية حرارية خاملة منخفضة الكثافة مشتقة من الهيدروكربون وتحتوي على العديد من الحبيبات الكروية بنسبة ٢% من البوليسترين و٩٨% من الهواء وهي ذات خواص فيزيائية متعددة تم الكشف عنها عن طريق عدة اختبارات فيزيائية قياسية اجريت على عينات مختلفة من الستريوبور.

٣-٥-١ كثافة الـ EPS

تعتبر كثافة الـ EPSكمعامل رئيسي لوصف قوة الإنضغاط والصلابة والزحف والخواص الميكانيكية الأخرى، حيث إن رغوة البوليسترين EPS لها وزن أخف بحوالي ٥٠ إلى ١٠٠ مرة من مواد التعبئة التقليدية، يقدم الجدول(١,٣) كثافة بعض المواد خفيفة الوزن المستخدمة في التعبئه والتغليف والعزل[37].

الجدول رقم (١,٣): كثافات لبعض مواد العزل والتغليف

Material	Density (kg/m³)
Volcanic ash soil	1200 - 1500
Fly ash	1100
Light clay (Leca)	800 - 1000
Tire chips	700 - 900
Wood chips	700 - 1000
Expanded beads mixed light weight soil	700 or more
Air foamed mortar and air foamed light weight stabilized soil	500 or more
EPS geofoam	14 – 32

يمكن تصنيع الـ EPSذات الكثافات المختلفة بخصائص تتعلق بنوعية ووظائف التطبيق المطلوبة، فمثلا يتطلب الـ EPSالمستخدم لأغراض العزل والبناء خفة الوزن حيث تتراوح مجالات الكثافة القياسية للـ EPS (16–32kg/m3) حسب الدراسات والمواصفات القياسية، ويمكن إنتاج كتل عالية الكثافة تصل إلى64kg/m3 . عادة ما يتم استخدام الكثافة 30kg/m3 أو أكثر للحصول على خصائص العزل المثلى، حيث تحدد كثافة الرغوة ل EPS وفقًا للمواصفة القياسية (ASTM D1622 2008)، وتتناسب تكلفة كتل EPS بشكل عام مع الكثافة.

يتم استخدام تصنيفات الـ EPSعلى أساس الكثافة من قبل الشركات المصنعة والمصممين،على سبيل المثال، يعرض معيار (ASTM D 6817) الأنواع والخصائص الفيزيائية وأبعاد البوليسترين الخلوي الصلب (RCPS) المعد للاستخدام، وبالمثل فإن (ASTM C578) هي المواصفات القياسية التي تغطي أنواع العزل الحراري من البوليسترين الخلوي الصلب (RCPS)[11].

٣-٥-٢ تأثير درجات الحرارة EPS

يستخدم البوليسترين الموسع لإنه خفيف الوزن ومقاوم للرطوبة وله أيضا عمر طويل وله معامل توصيل حراري منخفض حيث يعمل الـ EPSكعازل ممتاز لتدفق الحرارة على الرغم من إنه لايعمل بشكل جيد في مقاومة الحريق بسبب إنخفاض درجة حرارة نقطة الإنصهار.

تبين الدراسات إلى إن تليين الـ EPSيبدأ عند تعرضه لدرجات حرارة تتراوح من ١٠٠درجة مئوية إلى ١٢٠درجة مئوية، وينصهر EPS عند ١٦٠ درجة مئوية ثم يتبخر ويطلق غازات سامة عند درجة حرارة ٢٧٥ درجة مئوية.

٣-٥-٣ تأثير الحريق على EPS

البولستيرين الموسع عبارة عن هيكل مسامي يتيح تخزين الهواء على نطاق واسع مما يوفر الظروف المناسبة لتسريع انتشار الحريق خلال عمليات الاحتراق ولكن هناك عدة طرق لتحسين سلوك (EPS) في مقاومة الحريق ومنها[11]:

- تستخدم مثبطات اللهب من النوع غير الهالوجيني في الكبسلة الدقيقة، والتي ثبت إنها مادة حماية جيدة من الحريق، قد يكون أحد الأساليب لتحسين سلوك مقاومة الحريق لـ EPS هو إضافة كمية صغيرة أقل من ١% من المواد المقاومة للحريق على مادة العزل للبولستيرين الموسع، حيث تنتج سطوح جيدة التثبيط للهب من البولستيرين الموسع وبالتالي الحماية من الحرائق في الهياكل والمبإني وتقليل الكارثة المحتملة الناجمة عن الحرائق.

- تركيب الصوف المعدني على جدرإن EPS كحاجز لمنع الحريق هو الحل البديل هو إدخال إضافات مثبطات اللهب مثل أمونيوم متعدد الفوسفات أو ثنائي فوسفات ثنائي الأمونيوم أو إضافات حمضية أساسها الفوسفور وغيرها من المواد المثبطة للحريق والتي تقدم آلية لمقاومة الحريق من خلال التآزر بين الفوسفور والسيليكون والنيتروجين مما يؤدي إلى تكوين طبقة دفاعية.

٣-٥-٤ تأثير الماء على EPS

يجري اختبار امتصاص الماء وفقا لطريقة الاختبار القياسية ASTM C272-12، حيث استخدمت عينات الاختبار على شكل مكعبات بأبعاد (75mm*75mm*13mm)، وأخذت العينات بكثافات مختلفة وعادة مايتم قياس كتل العينات المكعبة الشكل بميزإن حساس بدقة 0.001g.

تعتبر طريقة الاختبار بسيطة وسهلة حيث تم إجراء الاختبار عن طريق غمر عينة الاختبار في وعاء أفقي تحت ١٥٠ مم من الماء لمدة ٢٤ ساعة، وبعد ذلك أزيلت العينات ومسح كل سطح من الماء بقطعة قماش جافة ونظيفة حتى لا يوجد أي أثر للماء وعلى الفور تم وزن الكتلة المبللة للعينات وتسجيلها بنفس الميزإن المستخدم سابقا.

يتم حساب امتصاص الماء من قبل الـ EPSبالنسبة المئوية ككتلة الماء التي تمتصها عينة EPS إلى كتلتها الجافة الأولية، وأجري الاختبار لثلاث عينات ذات كثافة مختلفة وتم حساب متوسط قيمتها.

عند إجراء الاختبار وفقا للمعايير السابقة والالتزام بالمواصفة القياسية العالمية كإنت النتائج على الشكل التالي(-4.41% 2.88%-3.6%) لكثافات مختلفة على الترتيب(12-15-20kg/m3) على الترتيب حيث تظهر نتيجة الاختبار إن خاصية امتصاص الماء لـ EPS تنخفض مع زيادة كثافتها.

٣-٦ الخصائص الميكانيكية للبولستيرين الموسع

من المهم دراسة سلوك مادة EPS تحت شروط تحميل مختلفة لاستنتاج قوة الشد ومعامل المرونة وتغير الشكل تحت الضغط، حيث تمت دراسة خصائص الـ EPSبشكل تجريبي لسنوات عديدة من قبل العديد من الباحثين لتحديد الظروف المثلى لاستخدام الEPS بأفضل الطرق والتصميم الأمثل لمنتجاته.

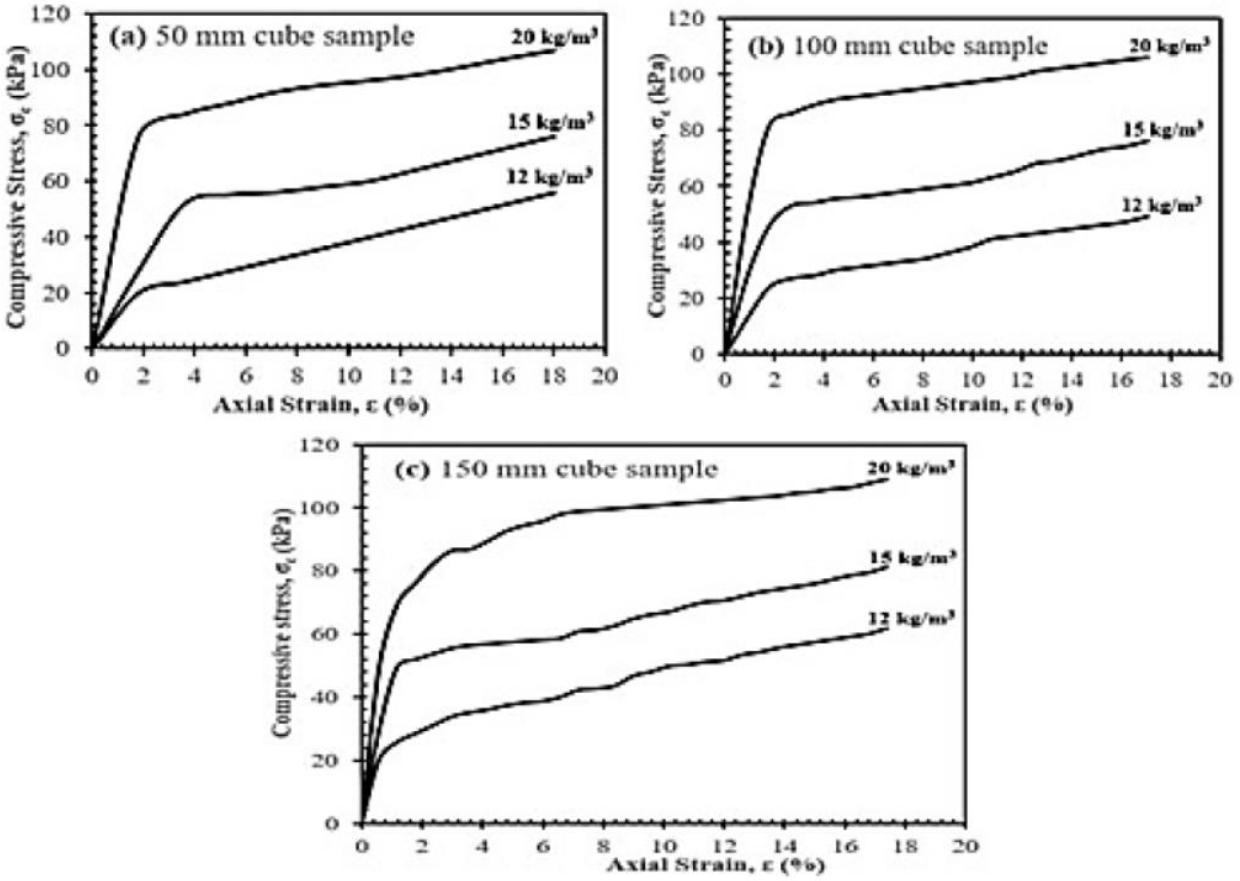
٣-٦-١ تأثير الضغط على EPS

يقدم اختبار الإنضغاط للEPS معلومات مهمة تتعلق بسلوك مواده ومنتجاته تحت الأحمال الإنضغاطية، حيث تجري إختبارات الإنضغاط وفقا لطريقة الاختبار القياسية العالمية(ASTM D1621-10)على آلة اختبار الضغط الرقمية والتي تتكون من فكين مسطحين لإجراء الاختبار أحدهما متصل بالقاعدة الثابتة لالة الاختبار والآخر متصل بالرأس المتقاطع المتحرك لنقل الحمل إلى عينة الاختبار، ومن المهم إن تكون أسطح الفكوك أكبر من سطح تحميل العينة للتأكد من إن تحميل العينة موحد.

تكون العينات المستخدمة في الاختبار عادة على شكل مكعبات الشكل بأبعاد(50-100-150mm) بكثافات مختلفة (12-15-20kg/m3).

من المهم أثناء تطبيق قوة التحميل إن تتم محاذاة العينات الموضوعة بين أسطوانات الضغط وخط الوسط الخاص بهم عند الخط المركزي لأسطوانات الضغط ليتم توزيع الحمل بشكل موحد على سطح التحميل الكامل للعينة.

بعد إجراء الاختبار حسب المواصفة الواردة سابقا تبين إن الضغط لـ EPS هو تابع للكثافة، حيث يوضح الشكل رقم (٦,٣) السلوك الإنضغاطي لمادة EPS تحت ظروف التحميل الإنضغاطي والتي من خلالها تم تحديد مقاومة الإنضغاط لمادة EPS وتوضح منحنيات الإجهاد والانفعال إن سلوك EPS تحت نظام تحميل الضغط يعتمد على كثافته.



الشكل (٦,٣) سلوك الإجهاد والانفعال لـ EPS لكثافات مختلفة تحت حمولات الضغط للعينات السابقة

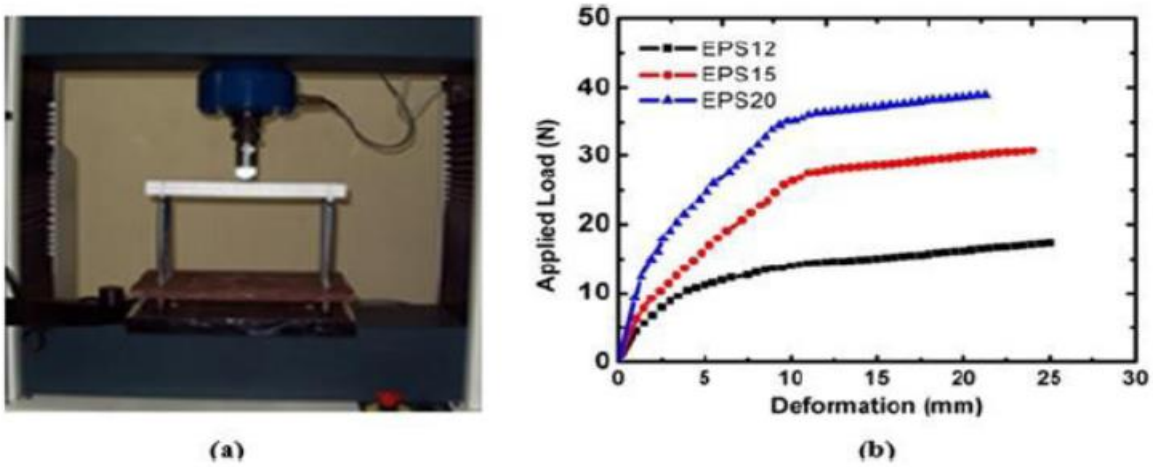
تؤدي الكثافة العالية لـ EPS إلى تحسين قوة تحمل الضغط، وتتشابه طبيعة منحنيات الإجهاد والانفعال مع جميع الكثافات والأحجام المختبرة من عينات الاختبار حسب المواصفة القياسية التي الاختبار وفقها.

تمثل النتائج المأخوذة من اختبارات الضغط الشكل الكاف للتعبير عن السلوك الميكإنيكي لل EPS في التطبيقات حيث تظل الضغوط العادية المطبقة أقل بكثير من إجهاد الخضوع أو حد الإجهاد المرن، حيث تبين إن الشكل والحجم ونسبة العرض إلى الارتفاع لعينات الـ EPSالتي تم اختبارها في اختبارات الضغط الغير المحصوره حيث إن لها تأثيرات ضئيلة نسبيا على مقاومة الضغط، في حين إن كثافة الـ EPSلها تأثير كبير على قيم مقاومة الإنضغاط وتزداد القوة مع زيادة الكثافة.

٣-٦-٢ تأثير الانحناءعلىEPS

يجري اختبار الانحناء على عينات الEPS حسب عدة مواصفات قياسية عالمية نذكر منها ASTM C203-12 حيث يجري على آلة اختبار عالمية مؤتمتة باستخدام ثلاث نقاط ارتكاز.

حيث اعتمد الطول بين نقطتي الارتاز الثابتة ٢٥٠ مم، وكإن تحميل الحمولة في منتصف العينة المتوضعة على الدعامتين الثابتتين وأبعاد العينة المختبرة(300*100*25mm)، وتم تحميل العينة بمعدل تشوه(4.2mm/min) على عينات مختلفة الكثافات، حيث يوضح الشكل رقم (٧,٣) نجهيز العينة للاختبار ونتائج الاختبار لكثافات مختلفة.



الشكل(٧,٣): اختبار قوة الانحناء على الEPS

(a) إعداد الاختبار (b) سلوك التشوه مع الحمل

من نتائج الاختبار كما هو وارد في الجدول رقم (٢,٣)، حيث لوحظ إن قوة الانحناء لـ EPS تزداد مع زيادة الكثافة وإنخفاض التشوه الحاصل في العينة ذات الكثافة الأعلى بسبب زيادة الصلابة والتي بدورها تزداد مع زيادة الكثافة.

الجدول رقم (٢,٣): الخواص الميكانيكية الناتجة عن الانحناء لكثافات مختلفة من الستريوبور

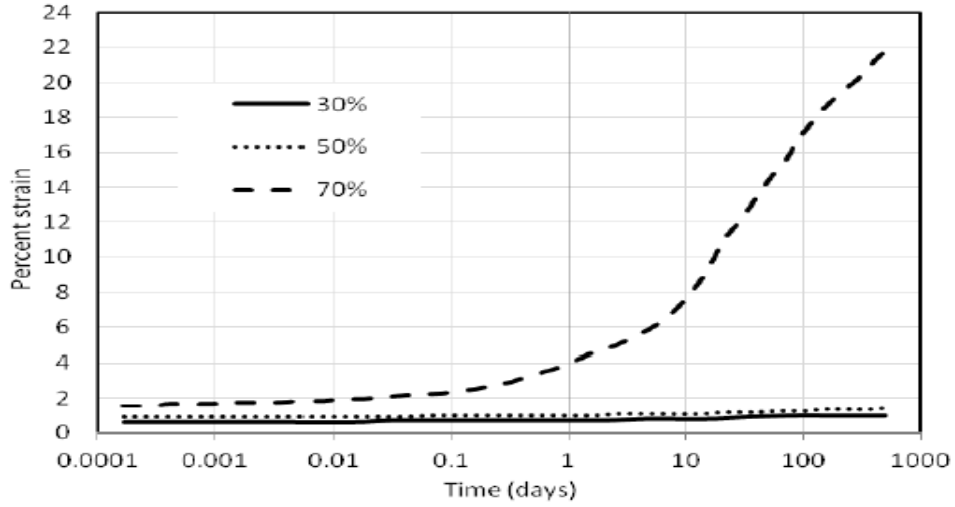
Density of geofoam, ρ (kg/m^3)	Properties				
	Compressive strength, σ_c (kPa)			Initial tangent modulus, E_i (kPa)	Yield strength, σ_y (kPa)
	At 1%	At 5%	At 10%		
12	16	32	48	1611	29
15	44	62	71	2769	52
20	72	97	112	5086	96

٣-٦-٣ تأثير الزحف علىEPS

يتعرض ال EPS لتشوهات الزحف نتيجة الأحمال أثناء الخدمة حيث تعتمد تشوهات الزحف بعد بناء وتشكيل ال EPS بشكل أساسي على مستوى ومدة التحميل، وتعتبر تشوهات الزحف هي الشغل الشاغل في التصاميم التي يدخل البولسترين في تركيبها لما لها من تأثيرات لاحقة في فشل المنتج تحت تأثير التحميل[44].

يعتبر الزحف ضئيلا ولن يتغير سمك الرغوة الأرضية EPS كثيرا خلال فترة زمنية طويلة إذا كإن الضغط الأولي أقل من ١,٥٪ حيث يتم اختيار قيم إجهاد العمل للحد من تشوهات الزحف إلى المستويات المقبولة على مدى عمر خدمة المنشأة.

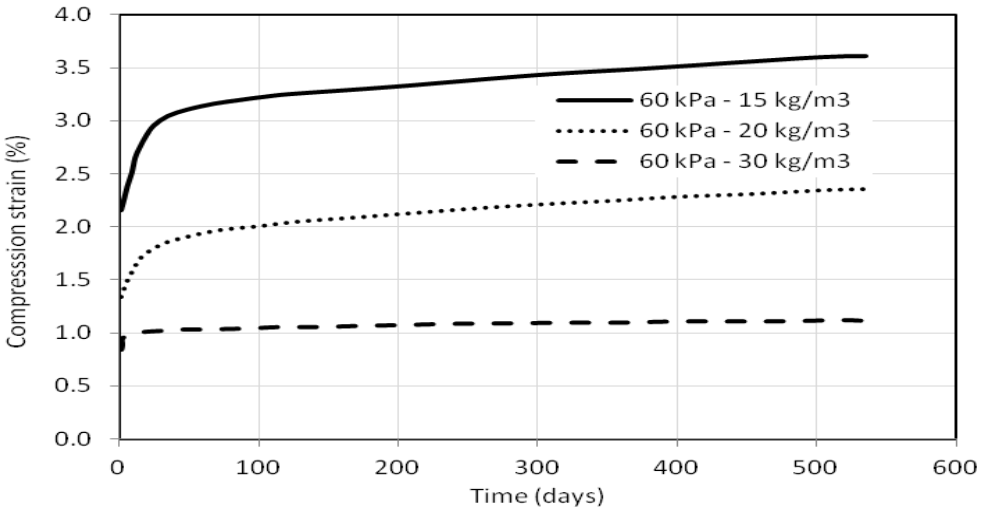
تم إجراء اختبارات الزحف على عينات مكعبة الشكل رغوية بحجم 50mm3 باستخدام مستويات إجهاد تبلغ ٣٠ و ٥٠ و ٧٠ و ٨٠٪ من مقاومة الإنضغاط. حيث أظهرت النتائج إن تشوهات الزحف يمكن اعتبارها ضئيلة لمستويات الإجهاد التي تقل عن ٣٠٪ من قوة الإنضغاط وهذا مايوضحه الشكل رقم (٨,٣)، وتبين أيضا إنه في حالة تعرض الEPS لأحمال أكبر من ٥٠٪ من مقاومة الإنضغاط تحدث تشوهات أكبر ناتجة عن الزحف[44].



الشكل رقم (٨,٣): سلوك زحف الEPS تحت مستويات الإجهاد المختلفة

إن سلوك الزحف لل EPS يتأثر بحجم العينة وكثافتها، حيث شهدت العينات الأكبر حجما تشوه زحف أقل خلال فترة زمنية معينة وتحميلا مكافئا، في حين إن العينات الصغيرة تعرضت لتشوه زحف أكبر من سابقتها.

تعتبر الكثافة من العوامل المهمة جدا التي لها تأثير على سلوك الزحف للEPS حيث شهدت العينات الأكثر كثافة زحفا أقل عند نفس المستوى ومدة التحميل للعينات الأخرى ذات الكثافات المختلفة كما هو موضح في الشكل رقم (٩,٣).



الشكل رقم (٩,٣): تأثير الكثافة على زحف الEPS

٣-٦-٤ نسبة بواسون لل EPS

يعتبر الـ EPS مادة متجانسة الخواص ومرنة خطية، لذا فإن قيمة معامل المرونة ونسبة بواسون ستكون مطلوبة للتحليل واستنتاج الخواص، يوضح الجدول رقم (٣,٣) قيم نسبة بواسون لبعض الدراسات التي أعدت مسبقا.

الجدول (٣,٣) قيم نسب بواسون ل EPS [44]

Author	Poisson's ratio expressions or values	Remarks
(Eriksson and Tränk 1991)	0.05	
(Duškov 1997a),	$\leq$ 0.15	
(Yamanaka et al. 1996)	0.075	
(Sanders 1996)	0.05 - 0.20	
(Horvath 1995)	$\nu = 0.0056\rho + 0.0024$	ρ = density (kg/m³)
(Preber et al. 1994)	$\nu = 0.20 - 0.5\frac{\sigma_3}{62kPa}$	σ_3 = confining stress (kPa) $0 \leq \sigma_3 \leq$ 62 kPa
(Chun et al. 2004)	$\nu = 0.0967+0.00308\rho - 0.0023\sigma_3$	ρ = density (kg/m³) σ_3 = confining stress (kPa)
(Wong and Leo 2006)	$\leq$ 0.15	
(Negussey and Sun 1996)	0.09 and 0.33	
(Momoi and Kokusyo 1996)	0.5	

بشكل عام، نجد إن نسب بواسون هي قيم موجبة صغيرة جدا للانفعالات الصغيرة وقيم صفرية أو سلبية للانفعالات الكبيرة، عند اجراء الاختبارات لا تأخذ نسبة بواسون باهتمام كبير بسبب عدم إنتظامها كقيمة ثابتة بالإضافة إلى تأثيرها الصغير على خواص المادة، حيث توجد مجموعة واسعة من التباين في قيم نسبة بواسون، وبالتالي فإن العوامل التي ينظر إليها على إنها تؤثر على تحديد نسبة بواسون تحتاج إلى دراسة أكثر تفصيلا.

٣-٦-٥ المقاومة الكيميائية لل EPS

لا يظهر الـ EPSأي تفاعل كيميائي مع الماء أو الملح أو المحلول القلوي، وتبين ذلك من خلال التجارب التي اعتمدت على تشريب الـ EPSبالمواد السابقة.

يعتمد التفضيل بين المواد اللاصقة والعلامات والطلاء للمواد المصنوعة من الـ EPSعلى عدم قابلية ذوبإن البوليسترين في بعض المذيبات العضوية التي تدخل في تركيب وتكوين المواد السابقة، حيث يتم تحديد التسامح الكيميائي للـ EPS حسب الوقت ودرجة الحرارة والضغط المطبق عليه.

تسبب الجدرإن الخلوية الرقيقة والسطح المكشوف الواسع لل EPS تعرضه الكبير لخطر هجوم المذيبات التي تسأهم في تليينه أو تشققه وحدوث الإنهيار، ومن المهم إبعاد الـ EPSعن الأشعة فوق البنفسجية لإنها تسأهم بشكل مباشر إلى اصفرار السطح وتفتيته، يوضح الجدول رقم (٤,٣) المقاومة الكيميائية لل EPS لبعض المحاليل والكواشف والمذيبات الشائعة.

الجدول رقم (٤,٣): المقاومة الكيميائية لل EPS لبعض المحاليل والكواشف والمذيبات الشائعة[44]

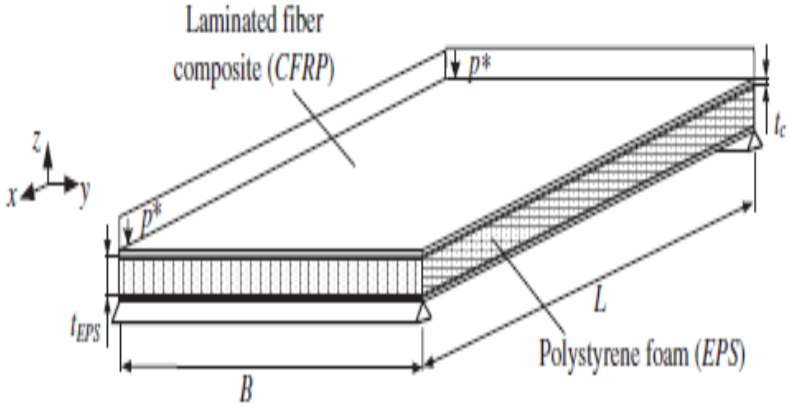
Attack Source	Extent of Resistance
Alkali solutions	Resisting
Sodium Hydroxide Solution	Resisting
Soap based	Resisting
Bitumen - air blown	Resisting
Oils based on silicon	Resisting
Sea Water or Salt Water	Resisting
Alcoholic compounds	Resisting
Microbes	Resisting
Vaseline, diesel, parafinn oil	Resistance limited
Organic Solvents	Non-resisting
Acids with high oxidation power	Non-resisting
High Octane no. petrol	Non-resisting
Oleum	Non-resisting
Aliphatic or Straight chain hydrocarbons	Non-resisting

٣-٧ الهياكل المركبة

تستفيد الهياكل المركبة من عدة مواد من مزايا الطبقات الهيكلية المختلفة المكونة لها والتي تختلف بخواصها فيما بينها سواء الخواص الميكانيكية أو الفيزيائية أو الكيميائية وعند التصميم الأمثل من نموذج المتراكب يمكن الاستفادة من المزايا مجتمعة لإعطاء سمات وميزات جديدة تختلف عن ميزات كل طبقة منفردة، فيمكن إن لها العديد من الخصائص المفيدة التي لا يمكن العثور عليها في المواد الأخرى مثل قوة الشد العالية، الكثافة المنخفضة، عزل حراري جيد، العزل للصوت، مقاومة التآكل، صلابة عالية الانحناء.

يمكن إن يكون للطبقات شكل هيكلي مختلف من حيث عدد الطبقات أو نوع الألياف المستخدمة حيث يمكن استخدام ألياف طبيعية أو صناعية بأشكل مختلفة كالشعيرات القصيرة أو الألياف الطولية أو الحصائر، وحتى يمكن إن تكون طريقة التنضيد مختلفة حسب الحاجة المرجوة من الصفيحة السندويشية، ويمكن استخدام الراتنجات بكافة اشكالها وأنواعها في تشكيل هيكل هذه الأنواع من المركبات [30].

تلعب مادة الحشو بين طبقات المواد المركبة البولميرية دورا هاما في تحديد الميزات التي يمكن إن يقدمها المتراكب المصمم، حيث يمكن إن نستخدم الفلين بأنواعه وكثافاته المختلفة وكذلك يمكن استخدام أنواع الخشب بكثافات منخفضة وكذلك الفوم وغيرها من المواد التي تصلح لكي تكون حشوة جيدة وتقدم خواص جيدة كالتخميد الجيد للاهتزاز أو المظهر الجمالي أو الوزن الخفيف وغيرها من المزايا، ويبين الشكل(١٠,٣) مثال عن مركب يتألف من الستريوبور كمادة حشو ومن صفائح المادة المركبة التي تتكون من ألياف الكربون الصناعية مع الإيبوكسي.



الشكل رقم (١٠,٣): نموذج من هيكل مواد متراكبة [33]

٣-٨ أهمية الهياكل المركبة

جرت عدة دراسات واختبارات (شد وانحناء وصدم) على هذه الأنواع من الهياكل بهدف استنتاج خواصها الفيزيائية (الحرارية والكثافة) والميكانيكية كقوة الشد العظمى ومعامل يونغ وإجهاد الإنكسار والانهيار تحت حمولات الانحناء ومحاكاتها على برامج عددية ومقارنة النتائج [43].

تكمن أهمية الهياكل المركبة من خلال الخواص النوعية التي تقدمها خلال عملها الوظيفي، ويتوقف نجاح المركب أو فشله بناء توفير المحتوى الصحيح من المواد المختارة للهيكل المراد إنتاجه وتحديد المناسب للأنواع والخصائص للمكونات المختلفة الداخلة في التركيب، وأثبتت هذه المتراكبات أهميتها ودخولها في عالم الصناعات الخفيفة والثقيلة اعدة أسباب نذكر منها[33]:

- تستخدم هذه الأنواع من المركبات في العديد من الصناعات[35] (الفضاء، العسكرية،السيارات، البناء، الآلات، الصناعات الكيماوية).
- ينتج عن اختيار المواد المناسب مادة مركبة ذات خصائص أكثر فائدة مقارنة بالمواد التقليدية الأخرى، فهذه الهياكل المركبة تستحق المقارنة مع الهياكل المعدنية، لإن تطبيق المواد المركبة بدلا من المعادن يوفر توفيرا كبيرا في الوزن بسبب كثافتها المنخفضة.
- تستخدم هياكل السندويتش المركبة على نطاق واسع لإن تقليل الوزن هو خاصية مهمة للغاية.
- السبب الرئيسي لاختيار الهياكل العازلة هو ارتفاع نسب القوة إلى الكتلة والصلابة إلى الكتلة مقارنة بالتركيبات المتجانسة.
- هياكل السندويتش المركبة أكثر تعقيدا هندسيا من الهياكل المتجانسة ولها تعقيد كبير من حيث السلوك لإنها من الممكن إن تتكون من مواد متجانسة الخواص مع مواد متباينة الخواص.
- يعتبر إجراء التصميم والمواد والشكل الأمثل لهياكل الشطيرة المركبة أكثر تعقيدا مقارنة بالهياكل المعدنية التقليدية نظرا لقوامها المتباين الخواص.

الفصل الرابع : الدراسات المرجعية

THE LITERATURE REVIEW

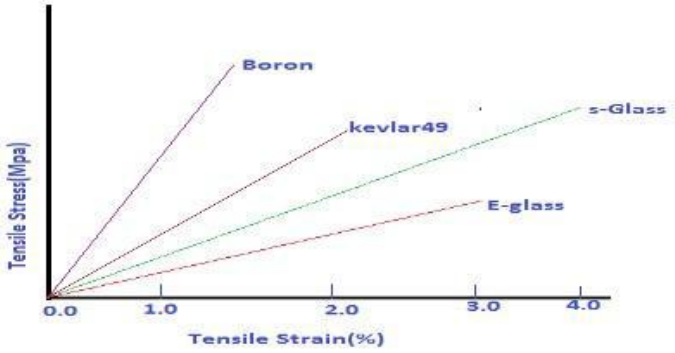
في عام ٢٠١٨ نشر نيراج كومار وزملائه هذه الدراسة في موقع علوم المواد وهندسنها[32]، حيث تم فيها إجراء دراسة مبدئية على نموذج مكون من ستريوبور وألياف صناعية، وتم أيضا دراسة ميزات المواد المستخدمة في صناعة هذا النموذج والمستخدم لأغراض خاصة معينة كالاستطلاع والمراقبة الجوية أو لمراقبة الطقس.

هذا النموذج مصمم لحمل ٢كيلو غرام أثناء القيام بمهمته في الجو يتوزع هذا الوزن بين أجزاء الكترونية وكاميرا وهيكل، وكإنت المواد المستخدمة في هذا النموذج هيكل من الكربون لحماية النموذج من الظروف الجوية وحماية الإلكترونيات والحمولات من المؤثرات الخارجية، وتم تدعيم الجزء السفلي للنموذج بألياف الكيفلر للتغلب على صعوبات الهبوط وتأثيرات الصدم ويستخدم هذا النموذج محرك دفع كهربائي والذي يساعد في جعل الطيران أكثر سهولة وسلاسة.

من الصعب إن تنكسر المواد المركبة تحت أحمال معينة أو إن تنخدش بسهولة لذلك من الصعب تحليل ما إذا كإن الهيكل الداخلي قد تضرر أم لا على عكس الالمنيوم الذي ينحني وينخدش تحت أحمال معينة وبهذا الشكل يعطي مؤشرات ودلالات على حدوث ضرر في الأجزاء الداخلية، وهذه أحدى عيوب المواد المركبة المستخدمة.

وتم التنويه لموضوع التكلفة الباهظة لهذه المواد والتي تم تعويضها من خلال توفير التكاليف على المدى الطويل وزيادة دورة الحياة.

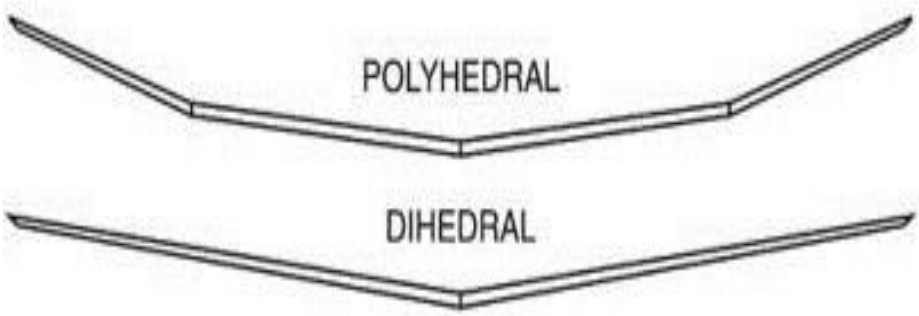
أحد الاختبارات التي تمت في هذه الدراسة، دراسة بعض أجزاء النموذج المصنوع باختصار مع توصيف بسيط للمواد المستخدمة واختيار المواد الإنسب للأجزاء بالإضافة إلى بعض الدراسات المختصرة عن بعض الخصائص الميكانيكية للألياف المستخدمة كالشد مثلاً كما هو موضح في الشكل رقم (١,٤).



الشكل (١,٤): مقارنة لخواص الألياف المعرضة للشد[32].

و نأخذ الجناح كمثال بسيط ويعتبر من أهم الأجزاء المكونة لهذا النموذج ويتطلب الكثير من الدقة سواء في تصنيع بروفيل الجناح أو المدادات الداعمة على طول الجناح أو الاضلاع الداعمة في التجاه العرضي للجناح كما هو موضح في الشكل رقم (٢,٤) والشكل رقم (٣,٤)[32].

الشكل(٢,٤): شكل الدعامات العرضية للجناح.



الشكل (٣,٤): أشكال ممكنة الاستخدام للجناح في مثالنا.

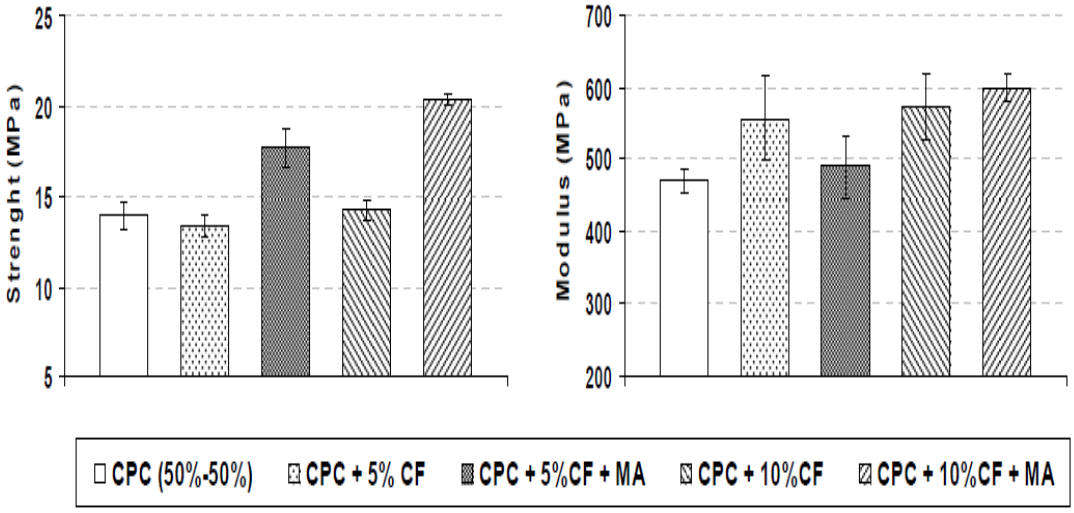
في عام ٢٠١٣ قام الباحث إيمانيويل وزملائه بتقديم هذه الدراسة في جامعة مينهو، حيث قامت هذه الدراسة على دراسة الفلين المدعم بالبولي ثيلين عالي الكثافة (HDPE)، حيث استخدمت ألياف طبيعية (ألياف جوز الهند) من أجل تقوية المركب السابق وتسأهم في تحسين الأداء نظرا لخواصها المميزة (كثافة منخفضة – تجدد المصدر – تكلفة منخفضة– قابلية التحلل البيولوجي)، وأجريت بعض الاختبارات على عدة عينات من نفس المنتج والتي اختلفت عن بعضها بنسب كل من الفلين والبوليمير والألياف (التي تم ذكرها لاحقاً)، وحددت هذه الدراسة إمكإنية استخدام مثل هذه المواد في

تصنيع التطبيقات الهيكلية ثلاثية الأبعاد، تم في هذه الدراسة تشكيل عدة إنماط من المركب المذكور السابق كما في الجدول رقم (١,٤):

الجدول رقم (١,٤): إنماط مختلفة التركيب من مركبات الفلين والمركب البوليميري

Sample Code	HDPE + Cork (wt.%)	Coconut Fibre (wt.%)	Coupling Agent (wt.%)	Natural Component (wt. %)
CPC (50-50)	50 - 50	0	0	50
CPC + 5% CF	50 - 50	5	0	53.5
CPC + 5%CF + MA	50 - 50	5	2	52.5
CPC + 10% CF	50 - 50	10	0	55
CPC + 10%CF + MA	50 - 50	10	2	54

تم إجراء اختبارات مختلفة في هذه الدراسة على عدة عينات وفق الجدول السابق وتم استنتاج الخواص الميكانيكية لمركبات البولمير/الفلين (50%–50%بالوزن) والمدعومة بألياف جوز الهند مع 2% بالوزن مع عامل التوصيل أو بدونه. التالية الموضحة في الشكل رقم (٤,٤).



الشكل رقم (٤,٤): الخواص الميكانيكية لمركبات البولمير/الفلين

في عام ٢٠٠٥ قام الباحث بكري عبد المجيد وزملائه في الولايات المتحدة الأميركية في كلية الهندسة الميكانيكية في جامعة وينونا [21]، بإجراء دراسة بعنوان التأثيرات المركبة للحمل والرطوبة ودرجة الحرارة على خصائص المواد المركبة

من الإيبوكسي مع ألياف الزجاج، حيث جرى فحص خصائص المواد المركبة ألياف زجاج / ايبوكسي قبل وبعد التحميل الميكإنيكي وفي شروط الرطوبة.

جرى في هذا البحث اختبار خصائص المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج قبل وبعد التحميل الميكإنيكي وفي شروط الرطوبة. تشير النتائج الأولية إلى إن مقاومة الشد ومعامل يونغ للمادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج تتأثر بوجود الرطوبة والتحميل الميكإنيكي مقارنة مع العينات الشاهدة، خلال فترات التعريض الاقل لدرجة الحرارة العادية، لوحظت زيادة طفيفة في مقاومة الشد وإنخفاض طفيف في معامل يونغ، وعند التعريض لفترات أطول، ٣٠٠٠ ساعة، لوحظ إنخفاض ملحوظ في المقاومة والضغط حتى الفشل.

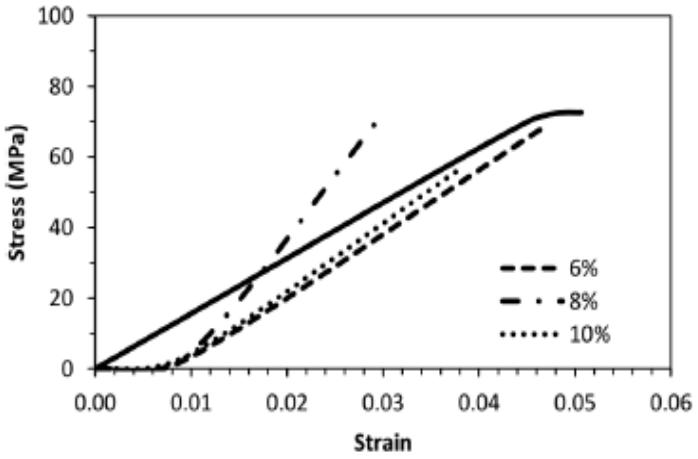
أظهرت العينات التي تم وضعها في شروط التحميل، في الماء عند ٦٥ درجة مئوية لمدة ١٠٠٠ ساعة إنخفاضاً أكبر في قيمة معامل يونغ. من المتوقع إن يكون للتحميل المستمر تأثير إيجابي على المدى القصير، وإن التعرض الطويل للرطوبة يؤدي إلى إنهيار قصف في درجة حرارة العادية، وإلى إنهيار لدن في درجات الحرارة العالية.

في عام 2016 قام الباحث أوزسي ميراجلو بنشر دراسة في تركيا في جامعة ساكاريا[22]، حيث تم فيها إجراء دراسة تجريبية لمعرفة خصائص الشد والانحناء والصدم والصلابة لمركبات الايبوكسي المقواة بألياف الكربون لتعزيز الخواص الميكانيكية للمركب.

المواد المستخدمة في هذه الدراسة كإنت ألياف الكربون المفروم بطول 6mm حيث تسخدم للتسليح، والإيبوكسي المستخدم هو أحد راتنجات الايبوكسي (MGS L285) والمقسي المستخدم هو (HGS L285) بنسب ١٠٠:٤٠، حيث تم تصنيع أربع أنواع من العينات وكل عينة تحتوي نسب وزنية من الألياف مختلفة وهي على الترتيب 0%، 6%،8% ، 10% ، جرى تصنيع العينات باستخدام قالب مصمم خصيصا لهذه العينات، بعد خلط الريزين والمقسي والألياف تم سكب الخليط في القالب تحت تطبيق ضغط معين لتنجب وجود الفقاعات في المنتج النهائي، وبعدها وضع القالب في الفرن تحت درجة حرارة 60 درجة مئوية للمعالجة وأخيرا يوضع في الغرفة لمدة ٢٤ ساعة ليتم خضوعة لشروط الغرفة لتتم التقسة النهائية ويصبح المنتج جاهز للاختبار، وأجريت الاختبارات المطلوبة بالاعتماد على مواصفة قياسية عالمية ASTM 638(1996)، وكإنت أبعاد العينة المصنعة وفق المواصفة المتبعة.

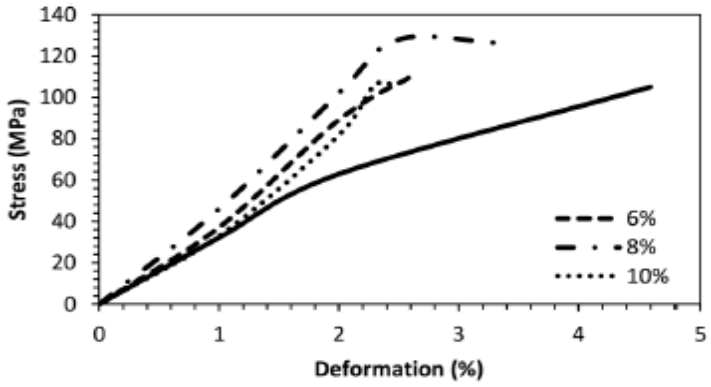
أظهرت نتائج الاختبارات إن الصلابة تزداد مع زيادة نسبة ألياف الكربون في المواد المركبة، حيث زاد أداء الشد والانحناء حتى النسبة الوزنية 8% لألياف الكربون في المركب ثم بدأت في الإنخفاض بعد هذه النسبة.

تظهر نتائج اختبار الشد في الشكل رقم (٥,٤)، حيث تبين إن التدعيم بالكربون المفروم كإن غير فعال في زيادة قوة الشد. حيث يمكن ملاحظة إن قوة الشد قد إنخفضت تباعا مع تزايد نسبة الألياف المقطعة المضافة للإيبوكسي وعند الغضافة 8% يصبح المركب شديد الهشاشة.



الشكل رقم (٥,٤): نتائج اختبار الشد[22]

تظهر نتائج اختبار الانحناء الذي جرى حسب المواصفة القياسية ASTM D790 (2010) في الشكل رقم (٦,٤)، بإن المواد المركبة تتمتع بقوة إنحناء أعلى مقارنة بعينات الايبوكسي النقي، حيث تبين من خلال التجارب التي تمت على عينات هذا الاختبار بنسب مختلفة إن النسبة الأفل والتي أخذت أفض قيم مقاومة الانحناء هي النسبة الوزنية 8% وأخت بالنقصإن بعد زيادة النسب الوزنية.

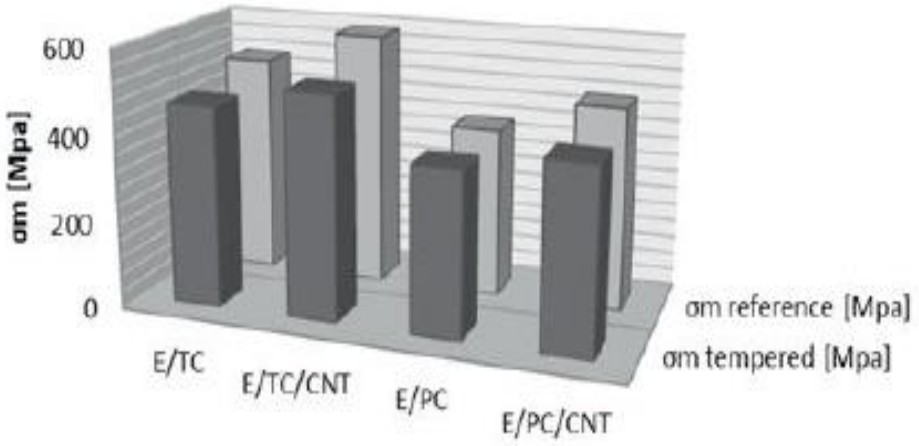


الشكل رقم (٦,٤): منحنيات اجهاد الانحناء للعينات المدروسة

في سنة 2014 قام الباحث لودميلا ديلوبوفا وزملائه بنشر هذه الدراسة في الكلية التقنية في جاكعة سلوفاكيا [23]، التي تتضمن تكوين مادة مركبة تتكون من ألياف الكربون الصناعية مع راتنج الإيبوكسي وإجراء اختبار الشد واستنتاج الخواص الميكانيكية لهذا المركب محاكاته على برنامج Nastran وتسجيل الخواص الميكانيكية الناتجة، وتمت فيها مقارنة النتائج، وتأتي أهمية هذه الدراسة من كون المركبات المستخدمة فيها هي مواد حديثة لمجموعة واسعة من التطبيقات (السيارات، الطيران، صناعة الأجهزة الرياضية) والمواد المستخدمة هي:

- المادة ذات الرمز E بالدراسة وهي الريزين.
- المادة ذات الرمز PC هي حصيرة منسوجة من ألياف الكربون نوع Plan بغراماج 160 g/m2.
- المادة ذات الرمز TC هي حصيرة منسوجة من ألياف الكربون نوع Twill بغراماج 220 g/m2.
- الماد ذات الرمز CNT هي مادة مكونه من ألياف الكربون والإيبوكسي وبنسبة 1% من ألياف كربونية نإنوية.

ويتم استخدام ريزين الإيبوكسي ثنائي الفينول مع المقسي ذو الرمز H507، ويتم إنناج العينة المحضرة على شكل ثلاث طبقات يتم تنضيده فوق بعضه وفق زوايا معينة وهي كما وردت في الدراسة 0/45/0 ويتم تعريض العينات لدرجة حرارة 80 درجة مئوية لمدة 12 ساعة لحدوث المعالجة الحرارة والتقسية ويظهر الشكل رقم (٧,٤) خواص العينات المصنعة وفق التريب الوارد في الجدول استنادا للمواد المعرفة سابقا.



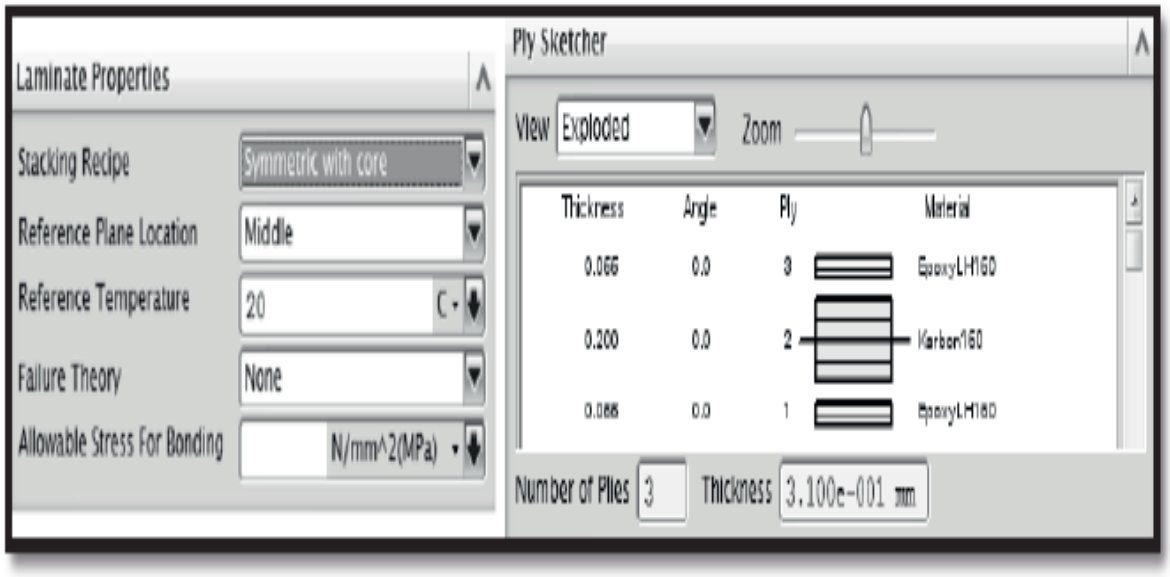
	E/TC	E/TC/CNT	E/PC	E/PC/CNT
σm tempered [Mpa]	466	517	380	422
σm reference [Mpa]	512	589	391	468

ويظهر الشكل رقم (٧,٤) خواص العينات المصنعة وفق التريب الوارد في الجدول المرافق. [23]

كما هو واضح في الشكل فإن العينات التي تحتوي على ألياف نإنوية ضمن النسيج الليفي، تزداد مقأومتها على الشد عند تعريضها لاختبار الشد، ولوحظ أيضا اختلاة مقاومة الشد بين نوع النسجين السابقين Plan و Twill ، وأظهرت العينات التي لم تتعرض لدرجات حرارة مرتفعة لتجفيف أسرع زيادة في قوة الشد بسبب المعالجة البطيئة للعينات المركبة التي تم إنتاجها واكتسبت العينات صلابة أكبر.

استخدام برنامج Nastran في هذه الدراسة حيث تم إنشاء نموذج المواد المركبة المسخدم في اختبار الشد بنفس عدد الطبقات وبتوجيه الزوايا المذكورة سابقا، حيث يعتمد هذا البرنامج بالتحليل على طريقة العناصر المنتهيه وتم اختيار نوع العنصر CQUAD4 بحجم 0.625 mm في شبكة ثنائية الأبعاد، والشكل رقم(٨,٤) يبين واجهة برنامج المحاكاة المستخدم في الدراسة، والشكل رقم (٩,٤) يوضح كيف يتم ادخال خواص كل طبقة وتشكيل الطبقات وفق البرنامج، ويوضح الجدول رقم(٢,٤) الخواص الميكانيكية للينات الناتجة عن المحاكاة وتمت مقارنة نتائج الاختبار مع نتائج المحاكاة.

الشكل رقم(٨,٤): واجهة برنامج المحاكاة المستخدم في الدراسة



الشكل رقم (٩,٤): ادخال خواص كل طبقة وتشكيل الطبقات وفق البرنامج

الجدول رقم(٢,٤): الخواص الميكانيكية للعينات الناتجة عن المحاكاة

Carbon cloth type	Number of plies	Resin	σ_m [MPa]	ε_m [%]	Orientation of plies [°]
Carbon plain 160	3	Epoxy 160	709	1.0	0 - 45 - 0
Carbon twill 220	3	Epoxy 160	756	1.5	0 - 45 - 0

في سنة ٢٠١٤ قام الباحث باكجي دايرو وزملائه بنشر هذه الدراسة [31] في كلية الهندسة الميكانيكية في جامعة شمال كوريا، تنأولت هذه الدراسة تصميم هجين من الكربون والبازلت والإيبوكسي ودراسة تأثير دمج ألياف البازلت على خواص الشد لشرائح الايبوكسي المقواة بألياف الكربون، حيث تعتبر هذه المواد المركبة خفيفة الوزن ومنخفضة التكلفة في الإنتاج ولها قوة وصلابة جيدة، حيث أظهرت إن قوة الشد والصلابة للصفائح الهجينة إنخفاضا خطيا ثابتا مع زيادة ألياف البازلت[31] .

بينت هذه الدراسة إن الترتيب والتعزيز بألياف البازلت في مركب CFRP تؤثر بشكل كبير على الخواص الميكانيكية لهذا المركب حيث أظهر دمج ألياف البازلت في البوليمر المقوى بألياف الكربون مقاومة شد أقل من مقاومة الشد لل CFRPولكن لديها إجهاد شد أعلى.

في هذه الدراسة، استخدمنا المواد التالية:

- الكربون المنسوج (C120−3K) بنوع نسيج Plain بكراماج 200g/m2 من إنتاج شركة كورية.
- الألياف البازلتية المنسوجة (EcoB4 F210) بنوع نسيج Plain بكراماج 210g/m2 من إنتاج شركة كورية.
- الراتنج المستخدم هو المستخدمة ثنائي الفينول المعدل (HTC−667C) من إنتاج شركة كورية ايضا.
- المقسي هو أمين أليفاتي المعدل (aliphatic amine) من نفس الشركة أيضا.

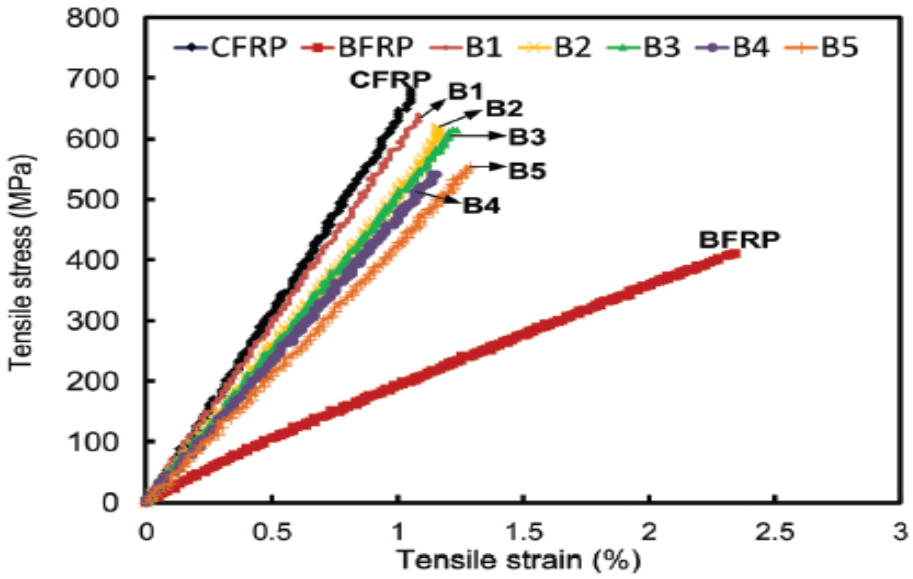
تم تصنيع عينات الشد بالاعتماد على المواصفة القياسية العالمية ASTM 638، المؤلفة من المواد السابقة وذلك بنسبة ثابتة من الإيبوكسي مع نسب مختلفة من ألياف الكربون (CF) و البازلت (BF) والجدول رقم (٣,٤) يبين العينات المصنعه في هذه الدراسة ونسب المواد الداخلة في تركيب كل عينة وقف ترميز مناسب والجدول رقم (٤,٤) يبين أهم الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الشد للعينات المصنعه في هذه الدراسة، ويوضح الشكل رقم (١٠,٤) منحنيات العينات المصنعه في هذ الدراسة وفق النسب المذكورة بالجدول رقم (٣,٤)، والتي خضعت لاختبار الشد[31].

الجدول رقم (٣,٤): العينات المدروسة بنسبها المختلفة من المواد[31].

Sample	Sample code	Number of fibers		Basalt fiber fraction (wt%)
		CF	BF	
CFRP	C	10	0	62
BFRP	B	–	10	61.9
$C_4B_1C_5$	B1	9	1	6.19
$C_4B_2C_4$	B2	8	2	12.4
$C_3B_3C_4$	B3	7	3	18.6
$C_3B_4C_3$	B4	6	4	24.8
$C_2B_5C_3$	B5	5	5	30.9
$B_2C_6B_2$	BC	6	4	24.8
$C_2B_2C_2B_2C_2$	CB	6	4	24.8

الجدول رقم (٤,٤): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الشد[31].

Hybrid code	Tensile strength σ (MPa)	Young's modulus E (GPa)	Tensile strain ε
CFRP	687	65	1.062
B1	630	60	1.07
B2	602	55	1.095
B3	558	50	1.1
B4	536	45	1.14
B5	502	40	1.2
BFRP	402	18	2.2



الشكل رقم (١٠,٤): المنحنيات الناتجة للعينات عن اختبار الشد [31].

سنة ٢٠٢١ قامت الباحثة سونيا شانسيز وزملائها بنشر هذه الدراسة في جامعة كارلوس في مدينة مدريد [30]، حيث تضمنت هذه الدراسة دراسة سلوك الصفائح المصنوعة من مادة الحشو وهي الفلين المدعمة بصفائح الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المنسوجة تحت تأثير سرعات متوسطة أقل من سرعة ثقب اللوحة المستخدمة في هذا البحث، حيث تم

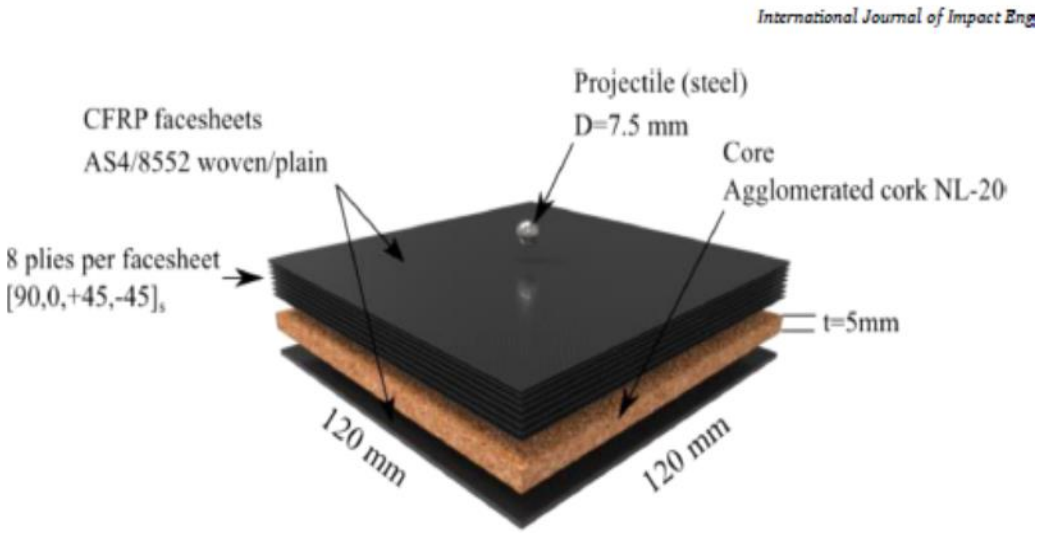
اختيار الفلين لإنه يعتبر مادة صديقة للبيئة بالمقارنة مع المواد البولميرية الأخرى، حيث إن الشكل رقم (١١,٤) يوضح نموذج الاختبار المصنع.

تم استخدام معايير الفشل للتنبؤ بتطور الفشل والضرر عبر اللوحة وبين طبقات مواد التقوية وبين الفلين مع طبقة المواد المركبة الملاصقة.

تم تطبيق المحاكاة والنمذجة العددية لهذا النموذج المصنوع من المواد السابقة وتم التأكد من صحة النماذج العددية للصفائح الخارجية باستخدام بيانات تجريبية وبيانات من الدراسات السابقة، ونم التحقق من نموذج الفلين المستخدم من خلال الاختبارت التجريبية التي تم اجراؤها في هذا العمل.

تم دراسة حالتين إحداهما عندما لايخترق المقذوف لوح الوجه الأمامي والثاني عندما لايخترق المقذوف الوجه الخلفي.

أظهرت النتائج أن النموذج العددي يتنبا بدقة بالإزاحات العرضية والاختراق عند مقارنتها بالواقع.



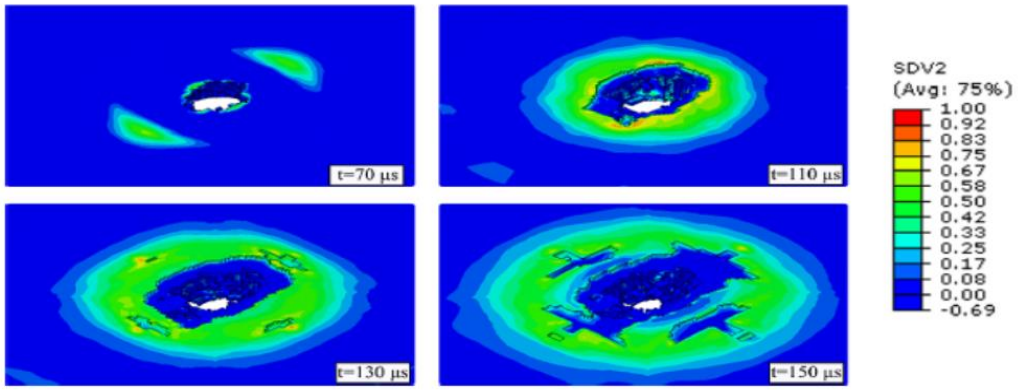
الشكل رقم (١١,٤): نموذج الاختبار [30]

واستخدمت هذه الدراسة المواد التالية[30] :

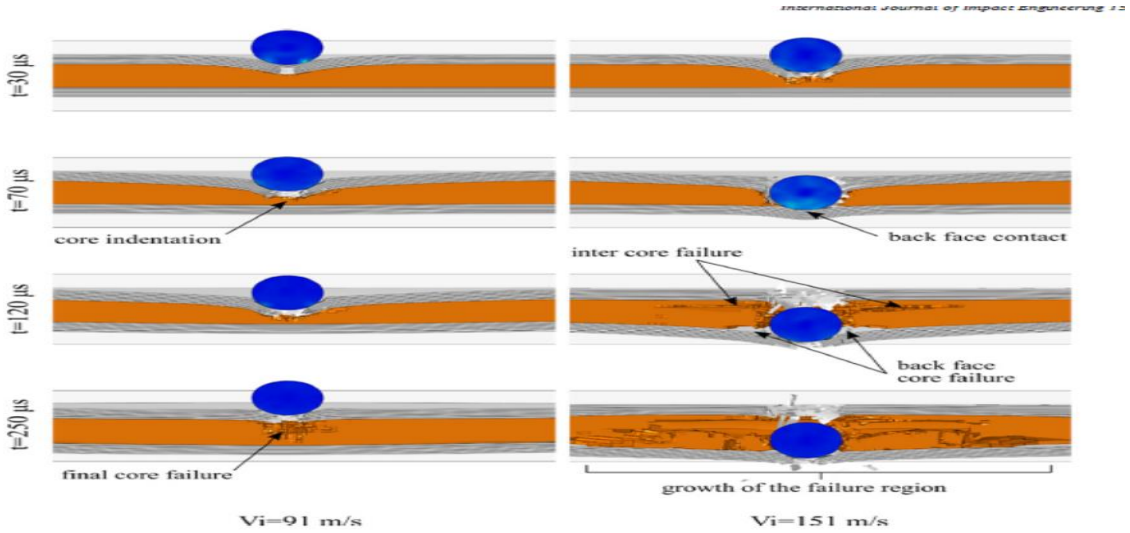
- ألياف كربون منسوجة بأربع طبقات وزوايا توجه مختلفة من نوع Plain.
- فلين ذو كثافة ٢١٥ kg/m3 5mmمن نوع Nl20.
- كرة فولاذية تستخدم للصدم بقطر 7.5 mm وكتلتها 7.98g بسرعات مختلفة.

ومن أهم النتائج التي تم استنتاجها في هذه الدراسة:

- استنتاج التشوه الحاصل في الطبقات نتيجة الصدم وبسرعات مختلفة.
- استنتاج معاملات الإنهيار للطبقات حسب معيار Tsai-wu .
- استنتاج السرعات التي تؤدي إلى اختراق الطبقة الأولى والطبقتين الأولى والثإنية معا والطبقات الأولى والثإنية والثالثة معا واختلاف السماكات للطبقات المكونة للمادة المركبة، كما هو موضح في الشكلين رقم (١٢,٤) و(١٣,٤)[30].



الشكل رقم (١٢,٤): التاثر حول الثقب



الشكل رقم (١٣,٤): الاختراق الناتج عن الصدم[30]

في سنة ٢٠٢٠ قام الباحث علي سلامة بنشر هذه الدراسة في المعهد العالي للعلوم التكنولوجية في مدينة دمشق[47]، تم تحضير عينات من مواد مركبة تتألف من ألياف الزجاج وألياف الكربون بالاضافة إلى الإيبوكسي كمادة تقوية كما

تم تحضير وصلات ميكإنيكبة أحادية التراكب كما هو موضح في الشكل (١٤,٤) باستعمال تباشيم الطرق بين المواد المركبة والألمنيوم وتم تصنيع عينات واجراء اختبار الشد عليها لاستنتاج أهم الخواص الميكانيكية بالاعتماد على المواصفة القياسية العالمية ASTM D3039.

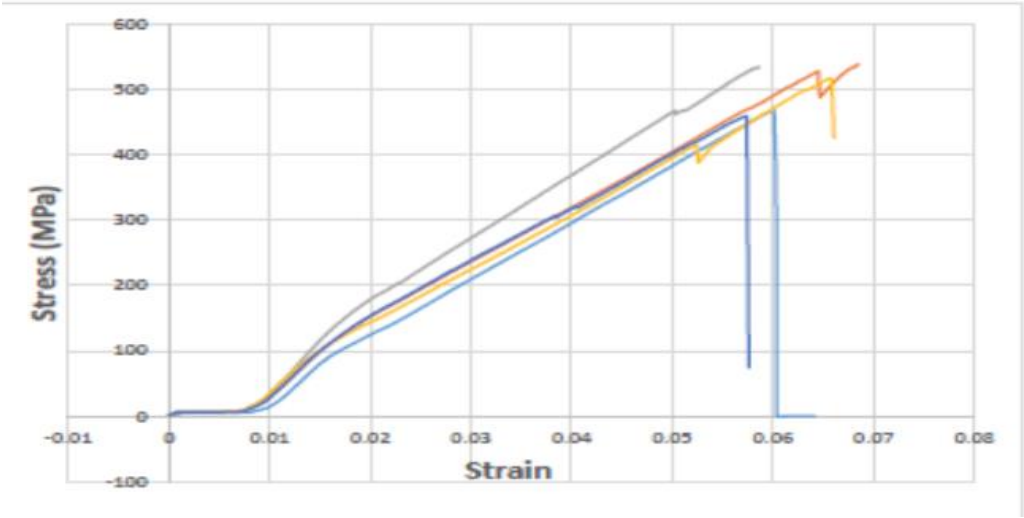
جرى دراسة الخواص الميكانيكية للمواد المركبة والوصلات الهجينة والتي تختلف باختلاف شروط التحضير ولا سيما نوع الليف وتعدد أنواع الألياف ضمن المادة المركبة وزأوية توجه الألياف وقطر ثقب التباشيم وغيرها من الشروط.

وتضمنت أيضا إجراء محاكاة عددية على برنامج محاكاة Ansys واستنتاج الخواص الميكانيكية الناجة عن المحاكاة ومقارنة نتائج المحاكاة مع نتائج الاختبارات التي أجريت للاستفادة القصوى من المحاكاة في تحديد السلوك الميكإنيكي للوصلات.

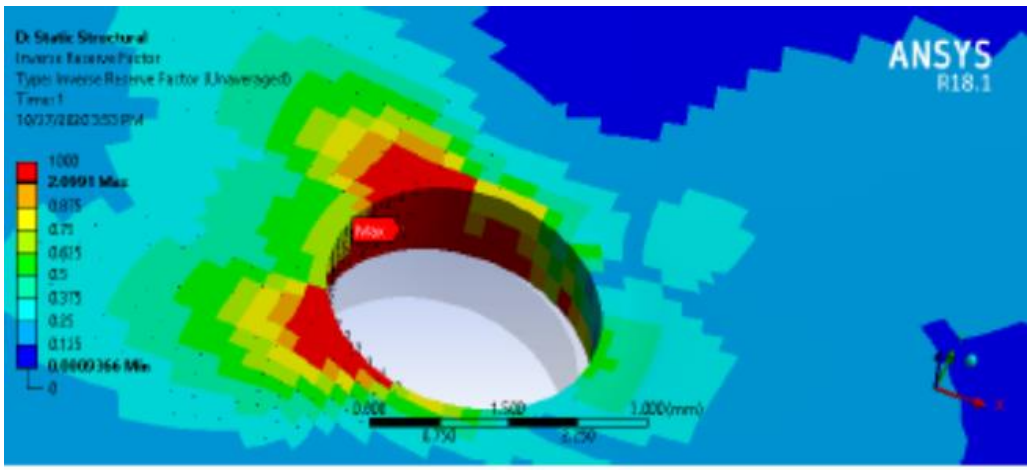
تم إجراء اختبار الشد على المواد المركبة والوصلات الهجينة واستنتاج الخواص الميكانيكية ويمكن إن نلخص أهم نتائج هذه الدراسة على الشكل:

- تحديد الخواص الميكانيكية للوصلات كقوى الشد العظمى والاجهادات الأعظميه كما هو في الشكل رقم (١٥,٤).
- إجراء محاكاة عددية لاختبار الشد على الوصلات المصنعة وفق هذه الدراسة.
- تحديد معاملات الإنهيار للعينات بالاعتماد على أكثر من معيار من معايير إنهيار المواد المركبة كما هو في الشكل رقم(١٦,٤).

الشكل رقم (١٤,٤): العينات المصنعة[47]



الشكل رقم (١٥,٤): نتائج اختبار الشد للعينات



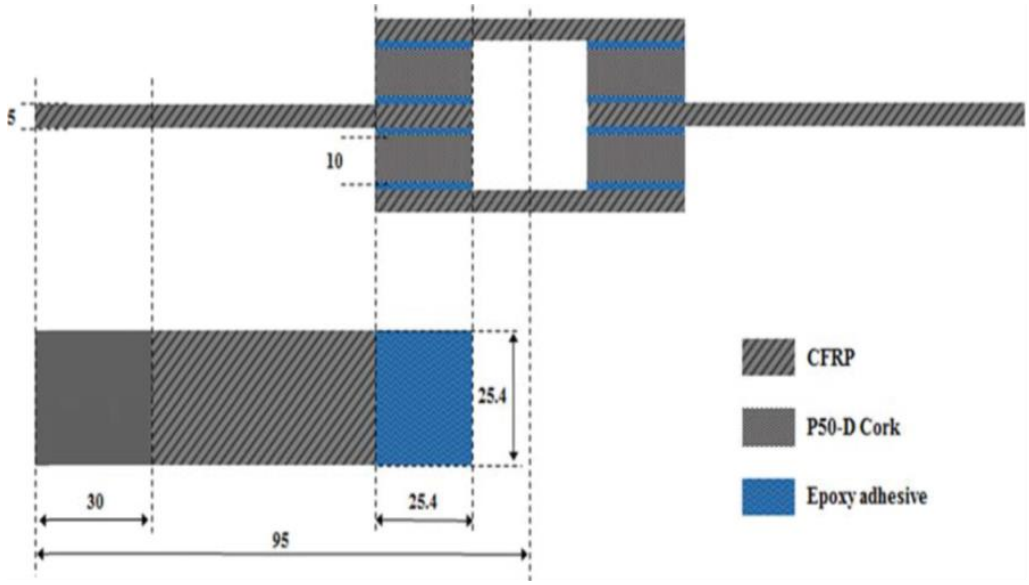
الشكل رقم (١٦,٤): معامل الإنهيار للثقب حسب معيار تساي–هو

سنة ٢٠١٨ قام الباحث ديستوفي وزملائه في جامعة مدريد بنشر هذه الدراسة والتي تتضمن موضوع الالتصاق السطحي بين الستايروبور وطبقة المواد المركبة البولميرية والخصائص التي تتغير مع التقدم في العمر أمر في غاية الأهمية في التطبيقات التي تعتمد على هذه النوعية من المنتجات، حيث يتم قياس قوة الالتصاق وفقا للمواصفة القياسية العالمية (ASTM D1002)بمتوسط سبع عينات وفيها يتم تحضير عينات خاصه واجراء اختبار الالتصاقية من خلال تطبيق قوى قص عليها وتسجيل النتائج، حيث

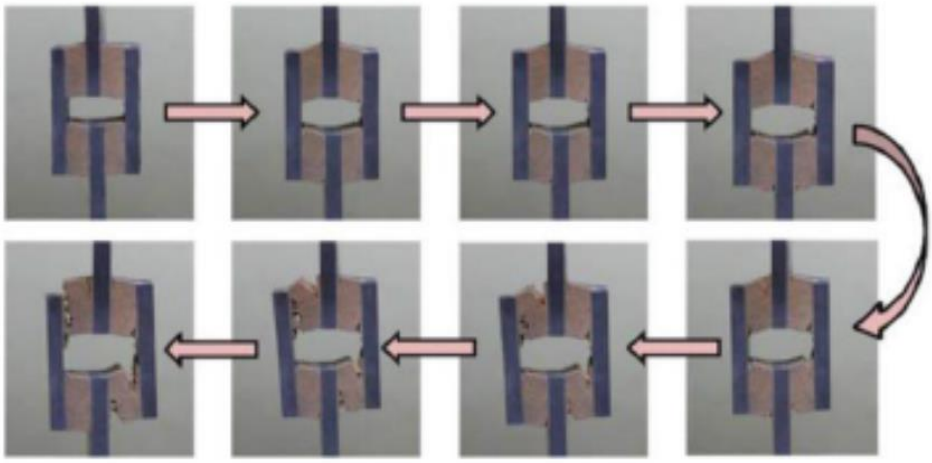
تتعلق متانة الالتصاقية بين طبقة المواد المركبة البولميرية والستايروبور بعدة عوامل يجب التوقف عندها واختيار الإنسب منها لإنتاج منتجات تؤدي العمل الوظيفي الموكل إليها بدقة، ومن أهم هذه العوامل درجة الحرارة والرطوبة وطريقة التصنيع ونوع المواد المستخدمة في المنتج المصنع[18].

المواد الاساسية المستخدمة هي الألياف الصناعية كالزجاج أو الكربون أو الكيفلر وكل نوع حسب نسبته الوزنية والمواد اللاصقة (كالإيبوكسي أو البوليستر) والستايروبور بحسب الكثافة.

في دراستنا هذه سوف نقتصر على دراسة الالتصاقية بين الستايروبور والمواد المركبة البولميريه التي تتكون من راتنج الأيبوكسي المدعم بألياف الكربون الصناعية يتم تصنيع عينات لمثل هذه الاختبارات المدروسة حسب الدراسة السابقة (ASTM D1002)، ويوضح الشكل (١٧,٤) شكل عينة الاختبار، ويظهرالشكل رقم (١٨,٤) شكل الإنكسار والتشوه الحاصل بالتدريج في عينة الاختبار مع التحميل الحاصل[18].



الشكل رقم (١٧,٤): عينة الاختبار



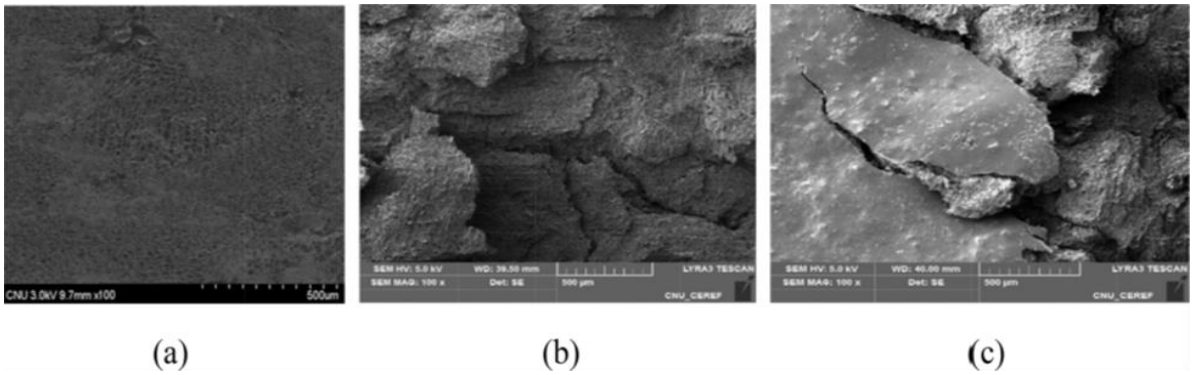
الشكل رقم (١٨,٤): شكل التشوه الحاصل عند تحميل عينة الاختبار

يوضح الشكل(١٩,٤) صور مجهرية لأشكال الكسر الحاصل في المركب المستخدم عند أعمار معينه، حسث تظهر هذه الصور اختلافا واضحا من حيث تشكل الشقوق وانتشارها وحجمها بالمقارنة بين ثلاث عينات من المركب بتقادم مختلف تحت شروط التحميل نفسها.

(a)العينة الأولى: حيث تم الاختبار على عينة من المركب الخام.

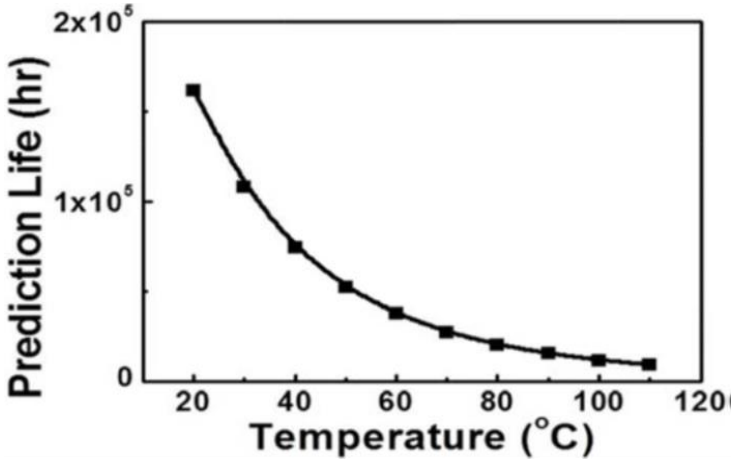
(b)العينة الثإنية: حيث تم الاختبار على عينة من المركب عند تقادم ٢٠٠٠ ساعة عمل بدرجة حرارة ٥٠ درجو مئوية .

(c)العينة الثالثة: حيث تم الاختبار على عينة من المركب عند تقادم ٢٠٠٠ ساعة عمل بدرجة حرارة ١٠٠ درجو مئوية.



الشكل رقم (١٩,٤): تمدد الشقوق الحاصلة مع اختلاف عدد ساعات العمل

يظهر الشكل(٢٠,٤) العلاقة بين درجات الحرارة والتقادم في العمر، حيث تكون العلاقة عكسية وبالتالي عند ارتفاع درجات الحرارة ينخفض عمر المركب عند تطبيق حمولة ثابتة.



الشكل رقم (٢٠,٤): منحني العلاقة بين درجة الحرارة والتقدم في العمر

تنخفض استطالة المركب في عينات مختلفة منه حيث تختلف من حيث التقادم في العمر(عدد ساعات العمل والتعرض للحمل)، حيث تنخفض استطالة هذا المركب ويزداد انتشار الشقوق كلما ازداد عمر المركب مع التعرض للحمولات القص.

الفصل الخامس: الإطار العملي للبحث

The Practical framework for research

٥-١ تمهيد (PREFACE):

سنتحدث في هذا الفصل عن الإطار العملي للبحث بشكله العام، حيث سنبدأ بالمواد المستخدمة في هذا الفصل من حيث خواصها الميكانيكية والفيزيائية وشكل تواجدها والشركة المصنعة لها وكيفية تحضيرها لإنتاج العينات، ثم ننتقل للحديث وتوصيف العينات بأبعادها الحقيقية التي تم تصنيعها بناء على مواصفات قياسية عالمية وهي عينات الشد والانحناء وعينات المادة الرابطة منفردة.

ورد في هذا البحث أيضا شرح ألية العمل على برنامج Ansys والذي يعتبر من البرامج الأكاديمية التعليمية في نمذج المواد واحتوائه على مكتبة واسعه من العناصر والمواد مع كامل خواصها ومعاملاتها، ويتم عرض واجهات أقسامه التي تم العمل فيها والحصول على النتائج التي سنوردها في الفصل اللاحق.

٥-٢ المواد المستخدمة

استخدم في هذا البحث أنواع عديدة من الألياف الصناعية والريزين والمقسي بالاضافة إلى الEPS ، والتي قدمنا شرح تفصيلي عنها في القسم النظري، وفي هذا الفصل سنورد المواد المستخدمة والأنواع التي تم استخدامها في هذا البحث.

٥-٢-١ الألياف:

تم استخدام ألياف الكربون والزجاج من النوع s والكيفلر 49 والهجين الذي يتكون من نسيج من الكيفلر مع الكربون بنفس الكراماج ويبين الجدول رقم (١,٥) خصائص ومواصفات الألياف المستخدمة.

الجدول رقم (١,٥): خصائص ومواصفات الألياف المستخدمة

الليف	الشركة	نوع النسيج	سماكة النسيج (mm)	الغراماج (g/m2)
ألياف الزجاج	**Hissa**	**Plane 1*1**	**0.25**	**200**

ألياف الكربون	**Hissa**	**Plane 1*1**	**0.3**	**200**
ألياف الكيفلر ٤٩	**Hissa**	**Plane 1*1**	**0.35**	**200**
ألياف الهجين	**Hissa**	**Plane 1*1**	**0.35**	**200**

٥-٢-٢ المادة الرابطة

المادة الرابطة هي عبارة عن اجتماع الإيبوكسي مع المقسي ويتم الخلط بنسبة بينهما (100-30) ويتم استعمالها في عدة تطبيقات أهمها تطبيقات الطيران حيث يتم المزج في درجة حرارة الغرفة ويبين الجدول رقم (٢,٥) خصائص ومواصفات الألياف المستخدمة.

الجدول رقم (٢,٥): خصائص ومواصفات الألياف المستخدمة

الخاصية	الشركة **Hissa**	
	ايبوكسي **BIRESEN* CR122**	مقسي **BIRESEN*CH122-1**
الحالة	سائل	سائل
اللون	شفاف	أصفر باهت
الكثافة **(g/cm3)**	**1.17**	**0.94**
اللزوجة **(mPa.s)**	٨٥٠	١٠

٣-٢-٥ البولستيرين الموسع (EPS):

يتم استخدام هذا الصنف من المواد المتجإنسة في عدة مجالات كالبناء أو العزل ويستخدم كمادة مالئة داعمة تفيد في تحمل الضغط والاجهادات والصدم كما ورد استخدامها في بحثنا هذا ونورد في الجدول التالي رقم (٣,٥) بعض خواصها الميكانيكية.

الجدول رقم (٣,٥): خصائص ومواصفات الستريوبور المستخدمة

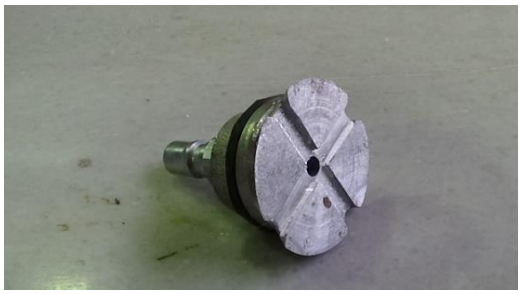
Density (gr/cm3)	٠,٠٢
Young modulus(mpa)	٤,٣٢
Poisson ratio	٠
Bulk modulus (mpa)	١,٤٤
Shear modulus (mpa)	٢,١٦

٣-٤ أدوات التحضير

احتاج البحث عددا من الأدوات لتصنيع عينات المواد المركبة ومجموعة من العدد لقص الألياف وتشبيعها بالريزين والمقسي ومن هذه المعدات والأدوات المستعملة:

- محفظة شفط بلاستيكية (نايلون مقوى غير مثقب).
- قماش ساتإن.
- نايلون مثقب
- لباد.
- مقصلة قص يدوية.
- جهاز قص كهربائي.
- أدوات مخبرية مساعدة.

- مضخة شفط مركزية: تستعمل مضخة الشفط الكهربائية المركزية والمركبة في مخبر المواد المركبة لتطبيق قوة ضغط تصل حتى 3bar لتشكيل صفيحة المواد المركبة عن طريق محفظة بلاستيكية يتم إحكام إغالقها من جميع الجوانب ولا يبقى منفذ سوى حلمات الشفط التي تتصل عن طرق إنابيب مطاطية متينة بمضخة الشفط. عند تشغيل المضخة، تقوم بتخلية الهواء بين المحفظة البالستيكية والصفيحة فتضغط المحفظة على الصفيحة، ويقوم اللباد بامتصاص الزائد من المواد المركبة ويوضح الشكل رقم (١,٥) صمام إنبوب الشفط.



الشكل رقم (١,٥): صمام إنبوب الشفط

- فرشاة يدوية وفرشاة دوارة: نقوم باستعمال الفرشاة اليدوية والاسطوانة الدوارة لإشباع الألياف بالمادة الرابطة ومحأولة طرد الفقاعات الهوائية منها لإنها تشكل نقاط ضعف في بنية الصفيحة المركبة في حال وجودها، يبن الشكل رقم (٣,٥) الاسطوانة والدوارة.
- ميزإن كهربائي: يستخدم ميزإن كهربائي دقيق لوزن الألياف والمواد الرابطة سواء الريزين والمقسي قبل الخلط، ويستخدم أيضا لوزن عينات صفائح المواد المركبة الناتجة لتحديد كتلتها التي تفيد في حساب الكثافة النظرية والتجريبية، ويوضح الشكل(٢,٥) الميزإن الكهربائي.

الشكل رقم (٢,٥): ميزإن الكتروني **الشكل رقم (٣,٥): الفراشاة الدوارة**

- قالب سيليكون: يستعمل القالب المطاطي في تشكيل عينات الإيبوكسي لاختبارها في جهاز اختبارات الشد والهدف هو استنتاج خواصها الميكانيكية كمعامل يونغ ومتإنة الشد وغيرها من الخواص.

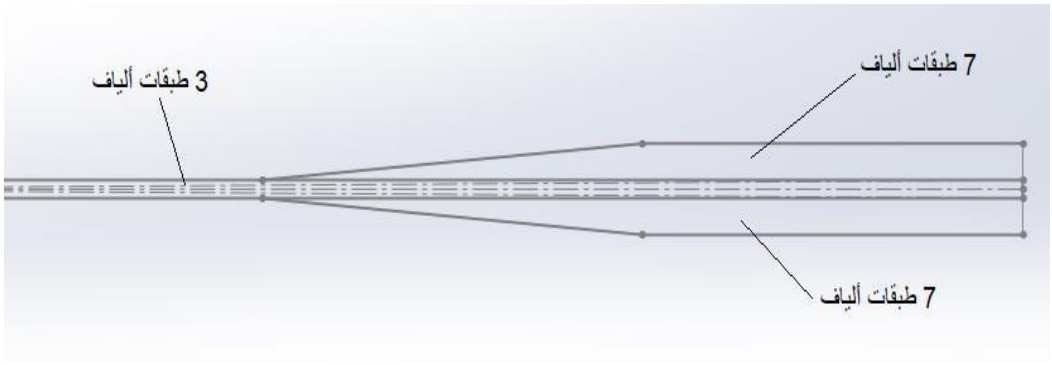
- فرن كهربائي: يستخدم هذا الفرن لتطبيق درجة حرارة معينة تصل الى ١٠٠ درجة مئوية بالتزامن مع تطبيق عملية الشفط على العينات المصنعة، وتفيد الحرارة الناتجة عن الفرن في تسريع عملية البلمرة للمواد الرابطة، ونستخمه أيضا في بلمرة المواد المركبة المستعملة في إنتاج عينات الإيبوكسي لاختبار الشد بعد وضعها في القالب السيليكوني ثم وضعها في الفرن.

٤-٥ تحضير عينات المواد المركبة:

٤-٥-١ تحضير عينات اختبار الشد:

جرى تحضير عينات المواد المركبة عن طريق تشكيل صفائح بطريقة القولبة بالتخلية والتحكم بعدد الطبقات للوصول للسماكة المطلوبة.

ويتم تشكيل عينات الشد حسب مواصفة قياسية عالمية والتي تقوم على وضع ثالث طبقات من الألياف المنسوجة ممتدة على طول الصفيحة تشكل المقطع المراد اختباره و٧ طبقات من الألياف المنسوجة في منطقة المماسك من كل اتجاه وأعلى وأسفل الصفيحة كما في الشكل رقم (٤,٥).

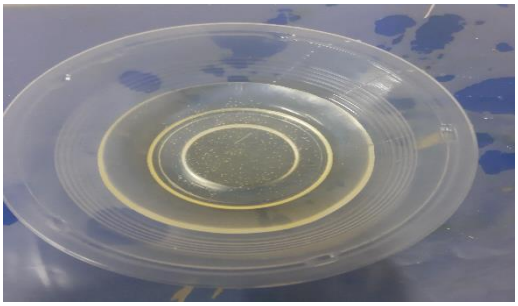


الشكل رقم (٤,٥): عينة اختبار الشد وعملية التنضيد

خطوات تصنيع عينات الشد بطريقة التخلية تتم على عدة مراحل وهي بالتفصيل:

- تنظيف طأولة العمل الرخامية المستوية ووضع طبقة من مإنع االلتصاق وهو عبارة عن شمع تجاري يستعمل كمإنع التصاق وملمع للرخام.
- وزن كمية من الإيبوكسي والمقسي بنسبة (١٠٠:٣٠) بدقة.
- خلط الإيبوكسي والمقسي مع التحريك جيداً حتى تجإنس المزيج كما في الشكل رقم(٦,٥) وتجهيز الألياف كما في الشكل (٥,٥).

الشكل رقم (٥,٥): قص الألياف وتجهيزها

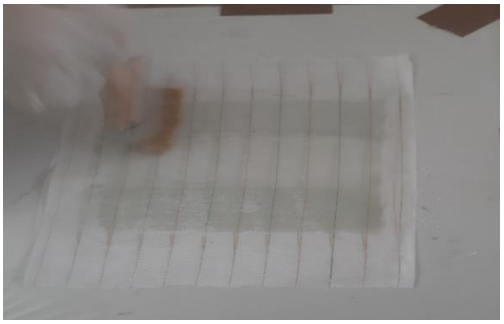


الشكل رقم (٦,٥): عملية خلط المواد

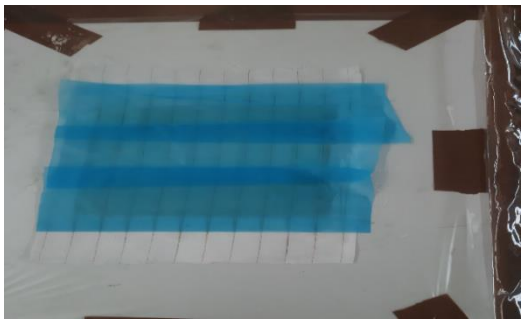
- تنضيد طبقة الألياف الأولى على طأولة العمل وغمرها بالمادة الرابطة ومدها باستخدام الإسطوإنة الدوارة حتى إشباع الطبقة بالكامل كما في الشكل رقم(٧,٥)، وتكرار عملية التنضيد لطبقات الألياف الأخرى وغمرها بالمادة الرابطة ومدها باالإسطوإنة الدوارة حتى نهاية التنضيد

الشكل رقم (٧,٥): مد واشباع طبقات الألياف

- وضع طبقة قماشية ساتإن ناعم لإعطاء نعومة لسطح الصفيحة كما في الشكل رقم (٨,٥)، ثم وضع محفظة بلاستيكية مثقبة لتسمح بمرور الكميات الزائدة من المادة الرابطة واحكام اغلاقها مع طأولة العمل كما في الشكل رقم (٩,٥).

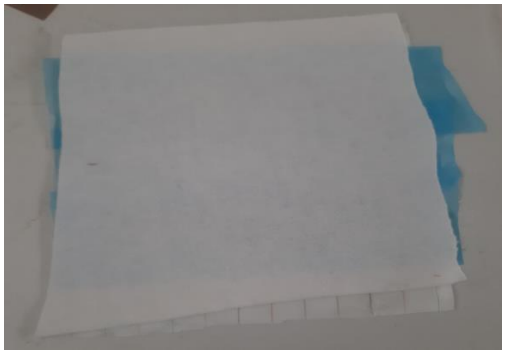


الشكل رقم (٨,٥) وضع طبقة الساتإن



الشكل رقم (٩,٥): وضع طبقة نايلون مثقب

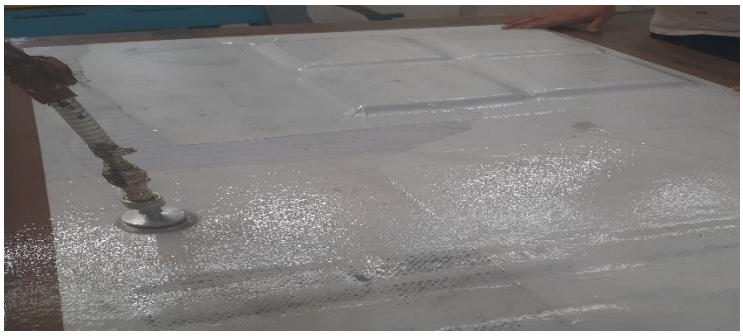
- وضع طبقة من اللباد لامتصاص الكمية الزائدة من المادة الرابطة ووضع حلمات الشفط فوق اللباد كما في الشكل رقم (١٠,٥)، ثم وضع محفظة الشفط البلاستيكية وإحكام إغلاق حلمات الشفط وحواف المحفظة مع طأولة العمل كما في الشكل رقم (١١,٥).



الشكل رقم (١٠,٥): وضع طبقة اللباد

الشكل رقم(١١,٥): وضع صمام الشفط

- وصل إنابيب الشفط وتشغيل المضخة المركزية وتطبيق الضغط المناسب كما في الشكل رقم (١٢,٥).



الشكل رقم (١٢,٥): شفط عينات المواد المركبة.

٤-٥-٢ تحضير عينات اختبار الانحناء:

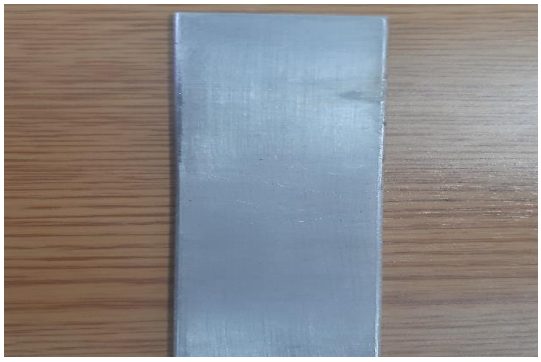
نستعمل الستريوبور (EPS) في تصنيع عينات الانحناء بالإضافة لصفائح المواد المركبة، حيث يتم تغليف الستريوبور من الوجهين بصفائح المواد المركبة البولميرية.

يلزم لتصنيع العينات عدة معدات ومراحل وهي :

❖ **معدات تجهيز الستريوبور:**

نستخدم لقص الستريوبور الة قص بالسلك الحراري وهي الة كهربائية نقوم باستخدامها لقص عينات الستريوبور وهي تعتمد على مقاومة مرور التيار الكهربائي فيه، ويمكن التحكم بدرجة حرارة السلك المصنوع من التنغستين عن طريق مقاومة كهربائية متغيرة طبعا بما ينساب كثافة الستريوبور المستخدم ويظهر الشكل رقم (١٤,٥)

الة القص بالسلك، سنستعمل صفيحة معدنية كمحدد لسير السلك وفقها وغالبا ماتكون من الالمنيوم وهي تأخذ شكل عينة الستريوبور بأبعادها الحقيقية حيث يتم شحذ الحواف لتسهيل مرور السلك عليها ويوضح الشكل رقم (١٣,٥) محدد القص.



الشكل رقم (١٣,٥): محدد القص

الشكل رقم (١٤,٥): الة القص بالسلك

❖ **معدات تجهيز صفائح المواد المركبة:**

هي نفسها معدات تجهيز صفائح المواد المركبة باختبار الشد ولكن هنا بوجود الستريوبور.

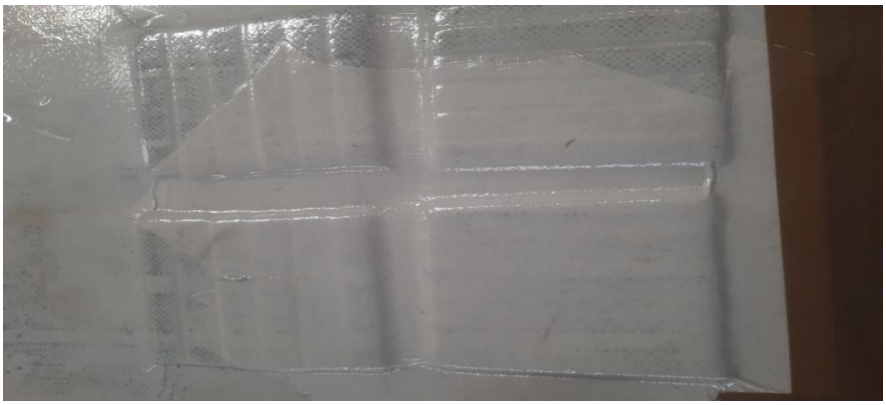
❖ **تحضير عينات اختبار الانحناء:**

يتم تحضير عينات الاختبار على عدة مراحل لإنها تتكون من أكثر من مادة وهي الستريوبور وصفائح الومواد المركبة، ويتم التحضير بالخطوات التالية:

- يتم قص عينة الستريوبور بابعاد وفق مواصفة قياسية عالمية وشحذ الحواف الحادة الناتجة عن عملية القص ويوضح الشكل رقم (١٥,٥) عينة الستريوبور.

الشكل رقم (١٥,٥): عينة الستريوبور.

- بنفس الطريقة في تجهيز عينات الشد المذكوره في الفقرة (٤-٥-١) وبنفس نسب الخلط للمادة الرابطة، نقوم بوضع ثلاث طبقات من الألياف المختارة مع التشبيع بالمادة الرابطة تم نضع عينة الستريوبور ونضع فوقها ثلاث طبقات من الألياف نفسها والتشبيع بالمادة الرابطة ويوضح الشكل رقم (١٦,٥) عينات الانحناء من أنواع الألياف الأربعة الكربون والزجاج والكيفلر49 والهجين المستخدمة في هذا البحث ضمن المحفظة البلاستيكية المعدة للشفط، حيث يتم بناء المحفظة البلاستيكية بالطريقة ذاتها في تصنيع عينات الشد.



الشكل رقم (١٦,٥): عينات الانحناء

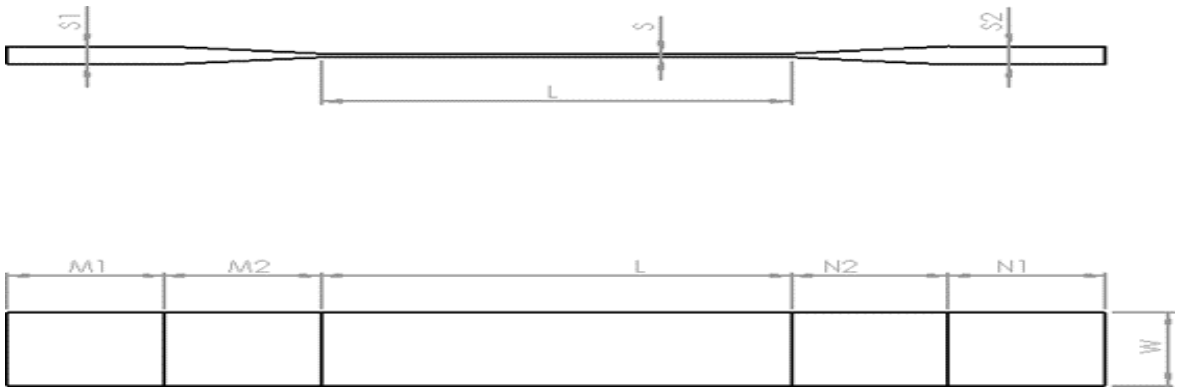
- يتم الشفط باستخدام المضخة المركزية ويوضح الشكل رقم (١٧,٥) وضع حلمة الشفط ووصلها بإنابيب المضخة لحدوث عملية التخلية وتطبيق ضغط حوالي 0.8 bar.

الشكل رقم (١٧,٥) تجهيز المحفظة البلاستيكية مع حلمات الشفط

٤-٦ توصيف العينات المستخدمة في الاختبارات لهذا البحث

٤-٦-١ عينات اختبار الشد:

تم تحضير هذه العينات وفق المواصفة القياسية العالمية (ASTM D3039) وفق المخطط الموضح بالشكل رقم (١٨,٥) لدراسة الخواص الميكانيكية الأساسية للمواد المركبة المستخدمة في البحث[19].



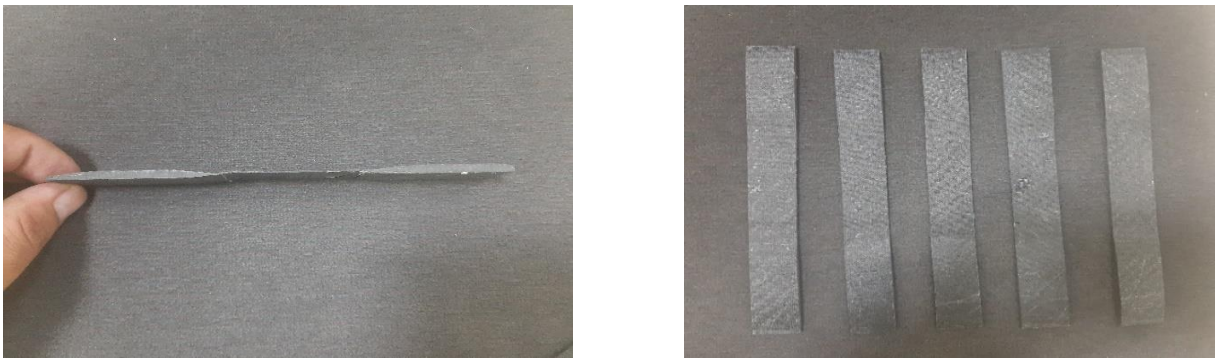
الشكل رقم (١٨,٥): مخطط عينات اختبار الشد

❖ **عينات شد ثلاث طبقات من ألياف الكربون- إيبوكسي**

تم تصنيع عينات الشد من الايبوكسي مع ألياف الكربون ذات الخواص المذكورة سابقا، والجدول رقم (٤,٥) يوضح أبعاد العينات الخمسه من هذا النوع والشكل رقم (١٩,٥) يوضح عينات هذا النوع.

الجدول رقم (٤,٥) يوضح أبعاد عينات الكربون

العينة	العرض	سماكة الجزء الفعال	الطول الفعال	سماكة الممسك الأول	سماكة الممسك الثاني
C1	23.72	0.99	70	3.89	4.1
C2	25.17	0.86	70	4.08	3.97
C3	24.12	0.9	70	4.02	4.08
C4	24.48	0.94	70	4.17	4.17
C5	24.35	0.97	70	4.04	4.07



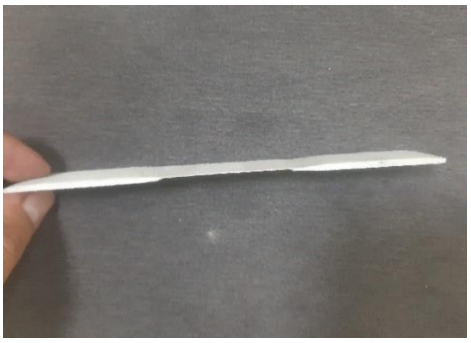
الشكل رقم (١٩,٥): عينات شد الكربون

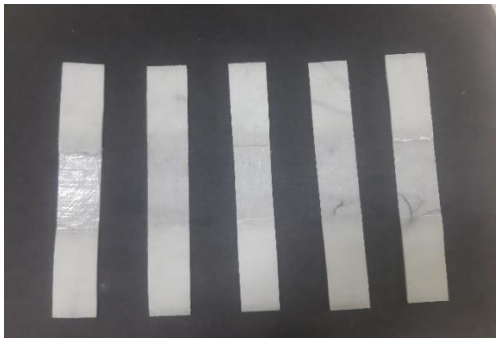
❖ **عينات شد ثلاث طبقات من ألياف الزجاج- إيبوكسي**

تم تصنيع عينات الشد من الايبوكسي مع ألياف الزجاج ذات الخواص المذكورة سابقا، والجدول رقم (٥,٥) يوضح أبعاد العينات الخمسه من هذا النوع والشكل رقم (٢٠,٥) يوضح عينات هذا النوع.

الجدول رقم (٥,٥) يوضح أبعاد عينات الزجاج

العينة	العرض	سماكة الجزء الفعال	الطول الفعال	سماكة الممسك الأول	سماكة الممسك الثإني
G1	24.5	0.58	70	2.9	2.91
G2	24.63	0.7	70	2.88	2.92
G3	24.55	0.63	70	2.87	2.9
G4	25.37	0.65	70	2.96	2.86
G5	24.69	0.63	70	3.03	2.87





الشكل رقم (٢٠,٥): عينات شد الزجاج

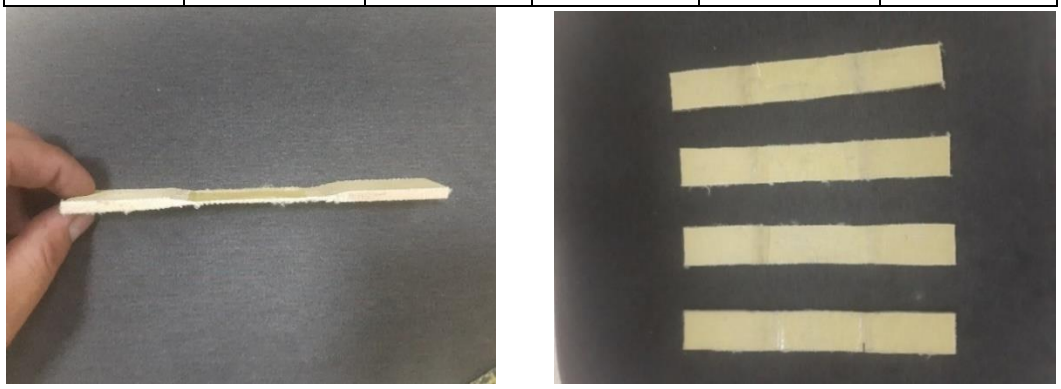
❖ **عينات شد ثلاث طبقات من ألياف الكيفلر- إيبوكسي**

تم تصنيع عينات الشد من الايبوكسي مع ألياف الكيفلر ذات الخواص المذكورة سابقا، والجدول رقم (٦,٥) يوضح أبعاد العينات الخمسه من هذا النوع والشكل رقم (٢١,٥) يوضح عينات هذا النوع.

الجدول رقم (٦,٥) يوضح أبعاد عينات الكيفلر

العينة	العرض	سماكة الجزء الفعال	الطول الفعال	سماكة الممسك الأول	سماكة الممسك الثإني
K1	24.82	1.2	70	4.58	4.57

K2	24.47	1.13	70	4.51	4.56
K3	23.96	1.08	70	4.57	4.57
K4	23.38	1.18	70	4.44	4.64
K5	24.66	1.15	70	4.64	4.62



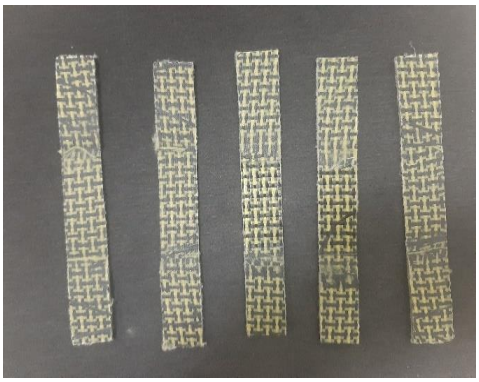
الشكل رقم (٢١,٥): عينات شد الكيفلر

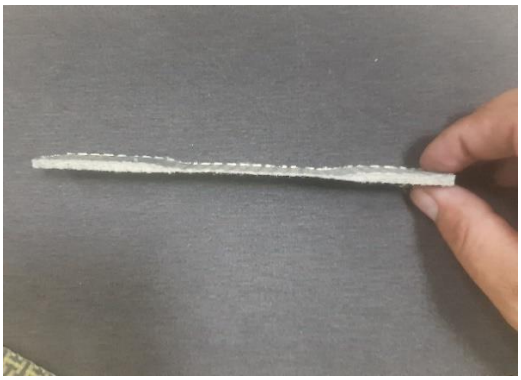
❖ **عينات شد ثلاث طبقات من ألياف الهجين– إيبوكسي**

تم تصنيع عينات الشد من الايبوكسي مع ألياف الهجين ذات الخواص المذكورة سابقا، والجدول رقم (٧,٥) يوضح أبعاد العينات الخمسه من هذا النوع والشكل رقم (٢٢,٥) يوضح عينات هذا النوع.

الجدول رقم (٧,٥) يوضح أبعاد عينات الهجين

العينة	العرض	سماكة الجزء الفعال	الطول الفعال	سماكة الممسك الأول	سماكة الممسك الثاني
W1	25.43	0.86	70	4.21	4.07
W2	25.26	0.84	70	4.07	3.9
W3	24.46	0.91	70	4.17	4.24
W4	24.16	0.9	70	4.17	4.2
W5	23.94	0.89	70	4.27	4.12





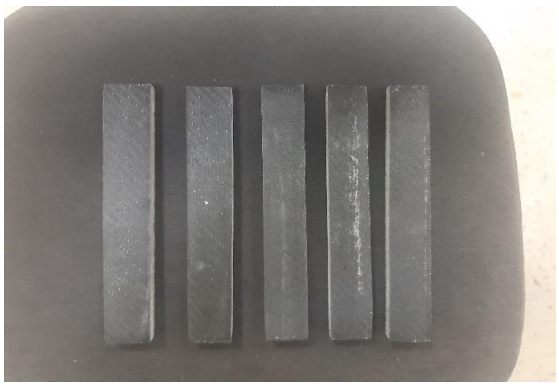
الشكل رقم (٢٢,٥) عينات شد الهجين

٤-٦-٢ عينات اختبار الانحناء

تصنع عينات اختبارا الانحناء وفقا للمواصفة القياسية (ISO 1209-2:2007) [19]، وفي بحثنا هذا تم اجراء اختبار الانحناء على عينات تتألف من الستريوبور مع صفائح المواد المركبة التي تتكون من الأنواع الأربع للألياف المذكورة سابقا على التوالي حيث يتم قص عينات الستريوبور كما ذكر سابقا بأبعاد(200*30*15mm) وبعد تدعيمها بطبقات المواد المركبة سوف تتغير أبعادها ولن تتماثل كل العينات بالأبعاد لإنها نتاج عمل يدوي وتشذيب يدوي ضمن مخبر المواد المركبة.

❖ **عينات إنحناء ثلاث طبقات كربون- ستريوبور- إيبوكسي**

تم تصنيع عينات الانحناء من الستريوبور المدعم بصفائح الكربون والإيبوكسي، والجدول رقم (٨,٥) يوضح أبعاد العينات الخمسه من هذا النوع والشكل رقم (٢٣,٥) يوضح عينات هذا النوع.



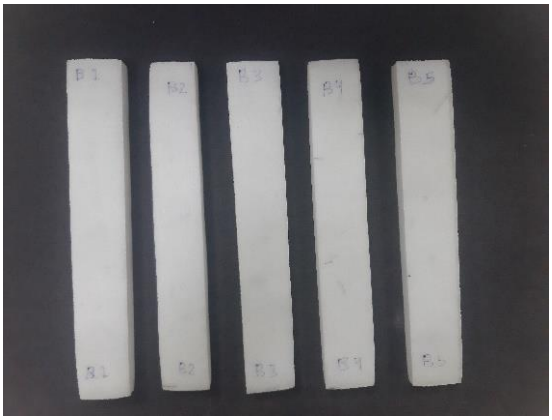
الشكل رقم (٢٣,٥): عينات إنحناء الكربون

العينة	الطول (mm)	العرض (mm)	السماكة (mm)
b-c1	٢٠٠,١	٣٠	١٧,٢
b-c2	١٩٦,٩٥	٢٩,٥	١٧
b-c3	١٩٨,٨٨	٣٠,٥	١٦,٥
b-c4	٢٠٠,٣	٢٩	١٦,٥
b-c5	٢٠٠,٢٥	٣١	١٧,٢

الجدول رقم (٨,٥): يوضح أبعاد عينات إنحناء الكربون

❖ **عينات انحناء ثلاث طبقات زجاج– ستريوبور– إيبوكسي**

تم تصنيع عينات الانحناء من الستريوبور المدعم بصفائح الزجاج والإيبوكسي، والجدول رقم (٩,٥) يوضح أبعاد العينات الخمسه من هذا النوع والشكل رقم (٢٤,٥) يوضح عينات هذا النوع.



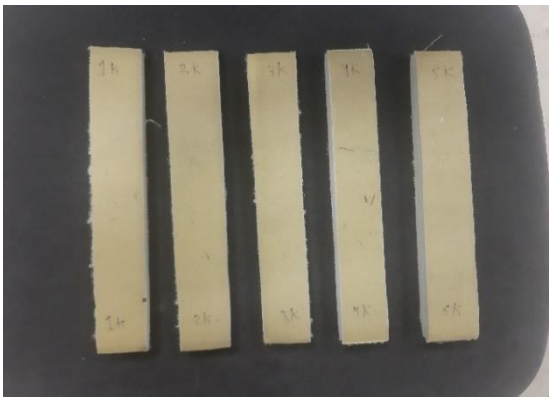
الشكل رقم (٢٤,٥) عينات إنحناء الزجاج

العينة	الطول (mm)	العرض (mm)	السماكة (mm)
b–g1	٢٠٠	٢٩	١٦,٩
b–g2	١٩٨,٥	٣٠	١٦,٨
b–g3	١٩٩	٣١	١٧,١
b–g4	٢٠١	٣٠	١٧
b–g5	١٩٨	٣١	١٦,٩

الجدول رقم (٩,٥) يوضح أبعاد عينات إنحناء الزجاج

❖ **عينات إنحناء ثلاث طبقات كيفلر– ستريوبور– إيبوكسي**

تم تصنيع عينات الانحناء من الستريوبور المدعم بصفائح الكيفلر والإيبوكسي، والجدول رقم (١٠,٥) يوضح أبعاد العينات الخمسه من هذا النوع والشكل رقم (٢٥,٥) يوضح عينات هذا النوع.



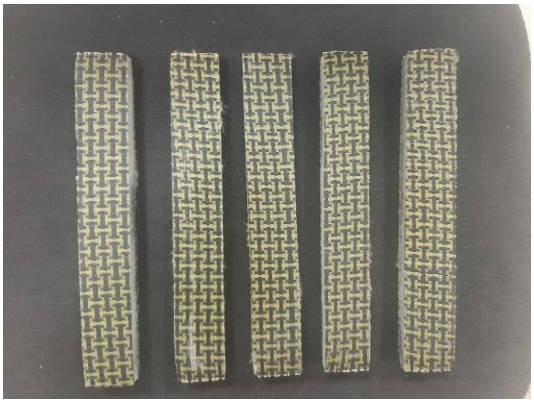
الشكل رقم (٢٥,٥): عينات إنحناء الكيفلر

العينة	الطول (mm)	العرض (mm)	السماكة (mm)
b–k1	١٩٨	٢٩,٥	١٧
b–k2	٢٠٠	٢٩,٨	١٧,٥
b–k3	٢٠١	٣٠	١٦,٩٨
b–k4	٢٠٠	٣٠	١٦,٩
b–k5	١٩٨	٣٠,٥	١٧,١

الجدول رقم (١٠,٥): يوضح أبعاد عينات إنحناء الكيفلر

❖ **عينات إنحناء ثلاث طبقات هجين– ستريوبور– إيبوكسي**

تم تصنيع عينات الانحناء من الستريوبور المدعم بصفائح الهجين والإيبوكسي، والجدول رقم (١١,٥) يوضح أبعاد العينات الخمسه من هذا النوع والشكل رقم (٢٦,٥) يوضح عينات هذا النوع.



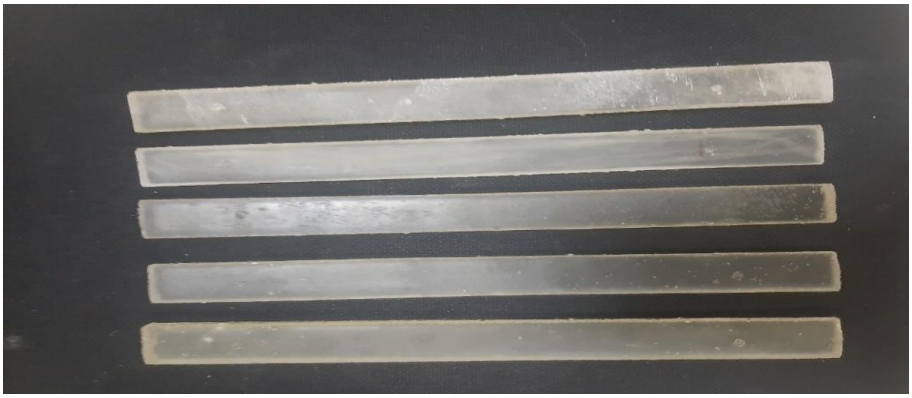
الشكل رقم (٢٦,٥): عينات إنحناء الهجين

العينة	الطول (mm)	العرض (mm)	السماكة (mm)
b–w1	٢٠٠	٣٠	١٧
b–w2	١٩٨	٢٩	١٦,٨
b–w3	١٩٩	٣١	١٧
b–w4	٢٠١	٣٠	١٧,٥
b–w5	١٩٩	٣٠	١٦,٩

الجدول رقم (١١,٥): يوضح أبعاد عينات إنحناء الهجين

٤–٦–٣ عينات اختبار الإيبوكسي

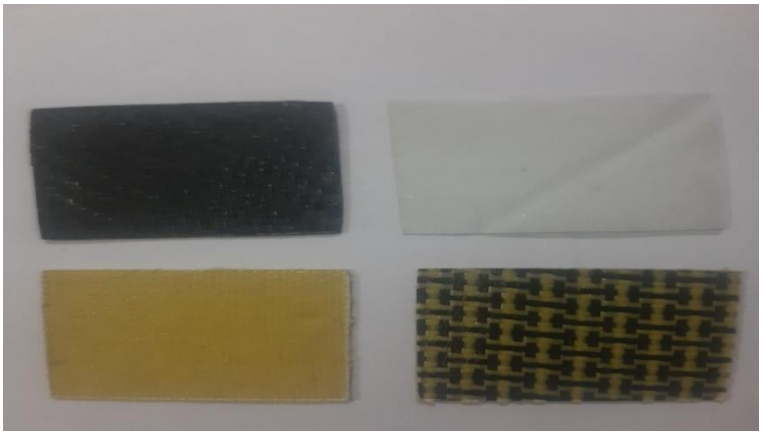
صنعت هذه العينات لتحديد المواصفات الميكانيكية الأساسية للمادة الرابطة لوحدها بدون ألياف، حيث تم صناعة هذه العينات بواسطة قالب سيليكوني حيث تم خلط الإيبوكسي والمقسي بالكميات المناسبة وبنفس نسبة الخلط المستخدمة في عينات الاختبارات ومن ثم تحريك الخليط جيداً حتى التجانس وخروج الفقاعات الهوائية ومن ثم صب المركب في القالب ووضع القالب في فرن التسخين ورفع درجة الحرارة إلى 70 درجة مئوية لحدث التقسية والتي استمرت لثلاث ساعات ويوضح الشكل رقم (٢٧,٥) عينات شد الإيبوكسي.



الشكل رقم (٢٧,٥): عينات شد الإيبوكسي

٥-٦ توصيف عينات قياس الكثافة والمسامية

في اختبار قياس الكثافة والمسامية نختار خمس عينات عشوائية من صفائح المواد المركبة بالأربع أنواع من الألياف وهي ذات أبعاد غير متسأوية لإن معظم العمل يدوي ولايمكن إنتاج أبعاد دقيقة، ويظهر الشكل رقم (٢٨,٥) العينات المختارة لقياس الكثافة والمسامية ويعطي الجدول رقم (١٢,٥) أبعاد عينات قياس الكثافة والمسامية.



الشكل رقم (٢٨,٥): عينات قياس الكثافة والمسامية

الجدول رقم (١٢,٥): أبعاد عينات قياس الكثافة والمسامية.

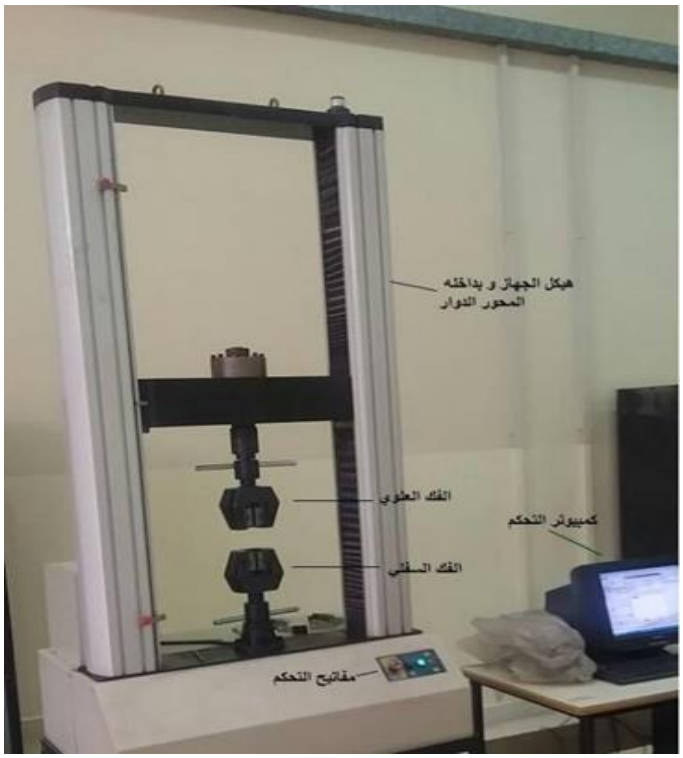
العينة	الطول(mm)	العرض(mm)	السماكة(mm)	الوزن(gr)
G1	2.5	2.47	0.76	٠,٥٥
G2	2.5	2.52	0.74	٠,٥٥
G3	2.5	2.47	0.77	0.6
G4	2.49	2.35	0.74	٠,٦
G5	2.49	2.46	0.73	٠,٦
C1	2.48	2.45	0.96	١0.7
C2	2.45	2.52	0.95	0.69

C3	2.62	2.40	0.99	0.7
C4	2.50	2.45	0.93	١0.7
C5	2.5	2.45	1.05	٠,٦٩
K1	٢,٥١	٢,٥	1.15	0.7
K2	٢,٤٤	٢,٤٦	1.21	0.7
K3	٢,٤٦	٢,٤٤	1	0.75
K4	٢,٣٨	٢,٤٥	1.22	0.65
K5	٢,٤٩	٢,٣٩	1.19	0.7
W1	٢,٤٥	٢,٣٨	1.15	٠,٧١
W2	٢,٥	٢,٤٩	1	٠,٧
W3	٢,٣٥	٢,٥١	0.99	٠,٧٣
W4	٢,٤٦	٢,٤٨	0.95	٠,٧٢
W5	٢,٤٨	٢,٤٢	1.1	٠,٧

٦-٦ آلة الاختبار:

نقوم بإجراء اختباري الشد والانحناء على نفس الالة في مخبر الاختبارات الميكانيكية حيث يمكن لجهاز الاختبارات الميكانيكية العامة من تنفيذ اختبارات الشد والضغط والإنعطاف[36].

تبلغ قوة الشد العظمى50kn وسرعة التحميل الأعظمية 1000mm/minويظهر الشكل رقم (٢٩,٥) الة الاختبارات العامة.



الشكل رقم (٢٩,٥): جهاز الاختبارات العام

يسمح جهاز الاختبارات العامة وفي بحثنا نقوم بإجراء اختبارين كما ذكرنا سابقا وهما اختبار الشد واختبار الانحناء ثلاثي نقاط الارتكاز ورباعي نقاط الارتكاز:

٦-٦-١ اختبار الشد

يعطي اختبار الشد منحني الاستطالة مع القوه المكطبقة ومنه نستنتج مخطط الإجهاد والانفعال، ويقدم عدة نتائج لمعاملات ميكانيكية، حيث نقوم بحساب بعض الخواص الميكانيكية التالية من خلال المنحني التي تعطيه الالة:

- مقاومة الشد: أعظم إجهاد شد تتحمله المادة.
- إجهاد الكسر: قيمة االجهاد عند الكسر.
- تشوه الكسر: أعظم تشوه للعينة.
- معامل المرونة: ميل المنحني في المنطقة الخطية، ويحسب من المعادلة (١-٥)

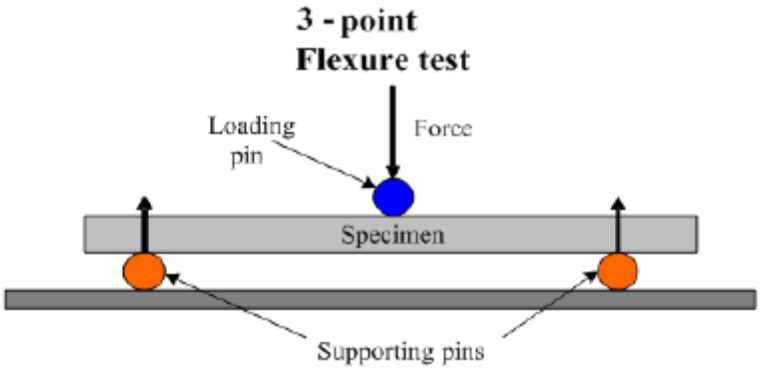
$$E=\sigma 2-\sigma 1/\varepsilon 2-\varepsilon 1 \qquad (١-٥)$$

- متانة الكسر: هي الطاقة التي تمتصها العينة حتى الكسر وتسأوي كامل المساحة تحت المنحني إجهاد-تشوه، وتحسب من المعادلة (٢-٥)[47]

$$R=0.5*E*\varepsilon 2 \qquad (٢-٥)$$

٦-٦-٢ اختبار الانحناء ثلاثي النقاط

يتم تصنيع العينات على شكل متوازي مستطيلات بطول وعرض وارتفاع وقد بينت أبعاد العينات الأربعة لاختبار النحناء في قسم توصيف العينات في فقرات سابقة، حيث توضع العينة المسطحة على مسندين بشكل متناظر ويكون المسند الثالث في منتصف العينة بين المسندين السابقين وتأخذ هذه المسافات من الدراسة المعتمدة في اختبار الانحناء حسب ال ASTM، ونقوم بتطبيق القوة بواسطة المسند الثالث في منتصف العينة حتى يتم الانهيار[46]، ومن الجدير بأنه يوجد اختلافات بسيطة بالأبعاد الثلاثة (طول- عرض- ارتفاع) بين العينات لأن تصنيعها يعتمد على اليد العاملة، حيث تم اجراء اختبار الانحناء على خمس عينات من كل من الصفائح ذات الألياف المختلفة ويوضح الشكل رقم (٣٠,٥) اختبار الانحناء[45].



الشكل رقم (٣٠,٥): اختبار الانحنار ثلاثي نقاط الارتكاز.

٦-٧ الكثافة التجريبية والنظرية لمادة مركبة ومساميتها

من المهم حساب الكثافات والمسامية لعينات المواد المركبة المستعملة في بحثنا هذا من خلال العينات المذكورة سابقا والخاصة باختبار الكثافة والمسامية، سنقوم بحساب كل من:

- **الكثافة التجريبية:** يتم حساب الكثافة التجريبية على عدة عينات من الأنواع الأربعة المستعملة في هذا البحث حيث إنها اختيرت عشوائياً من صفائح المواد المركبة المنتجة، وذلك بالاعتماد على وزنها المأخوذ من الميزان الإلكتروني وتحديد حجمها باستعمال القدم القنوية.
- **الكثافة النظرية:** تحسب الكثافة من القوانين التالية:

حسبت الكثافات النظرية للمواد المستخدمة من القوانين التالية:

النسبة الحجمية للألياف Vf = حجم الألياف/ الحجم الكلي للمادة المركبة

النسبة الحجمية للمادة الرابطة V_m = حجم المادة الرابطة(الإيبوكسي)/ الحجم الكلي للمادة المركبة

النسبة الوزنية للألياف W_f = وزن الألياف / وزن المادة المركبة

النسبة الوزنية للمادة الرابطة Wm = وزن المادة الرابطة / وزن المادة المركبة

وتحسب الكثافة النظرية للمادة المركبة من خلال المعادلة (٣-٥)

$$1/\rho c = Wf/\rho f + Wm/\rho m \qquad (٣-٥)$$

- أما المسامية والتي تعرف بإنها النسبة المئوية للفراغات أو الفقاعات في المادة المركبة فتحسب من خلال المعادلة (٤-٥)

$$V\upsilon=(\rho c - \rho_{c_{exp}}،)/\rho c \qquad (٤-٥)$$

حيث إن exp،ρc هي الكثافة المقاسة تجريبيا.

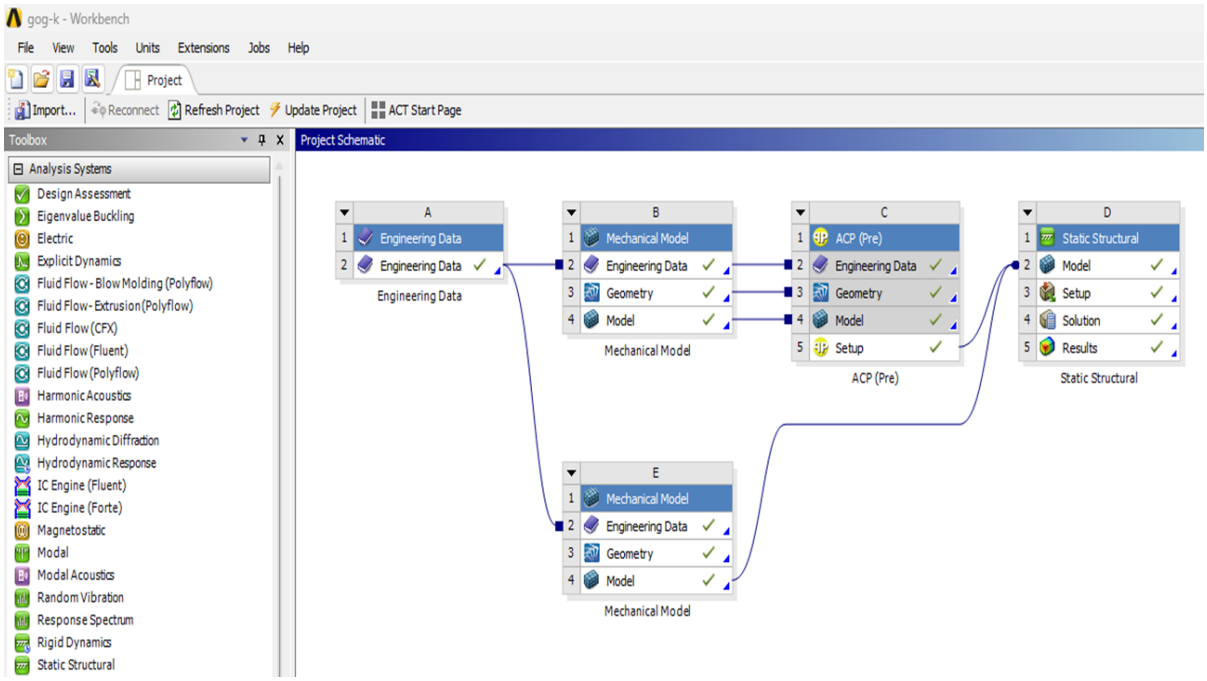
٨-٦ النمذجة العددية للاختبارات السابقة

٨-٦-١ مقدمة

هناك العديد من البرامج التي تعتمد على المحاكاة العددية للقطع المدروسة منها برنامج Ansys و برنامج Abaqus وغيرها من البرامج، ففي بحثنا هذا سنستخدم برنامج ال Ansys قسم Workbench وله أقسام وتشعبات كثيرة حيث يقوم بدراسات كثيرة منها الدراسات الحرارية أو الجريإن أو الدراسات الميكانيكية بكافة أنواعها ويدرس الكثير من أنواع المواد الموجودة ضمن المكتبة الخاصة فيه أو الممكن إضافتها من قبل المستخدم سواء كإنت متجإنسة الخواص أو غير متجإنسة، تقوم فكرة المحاكاة العددية على استعمال برمجية حاسوبية في حساب اإلجهادات والتشوهات الناتجة في القطعة عن طريق حل معادلات المتإنة الممثلة لحالات التحميل على القطعة بطريقة عددية من خالل تقطيع القطعة إلى عدد كبير من العناصر المنتهية. لذلك، تسمى هذه الطريقة بطريقة العناصر المنتهية (Finite Element Analyses)، حيث يقوم البرنامج بحل المعادالت التفاضلية الجزئية المعبرة عن تغير الشروط الحدية حول العناصر المقطعة، ومن ثم مكاملة التغيرات على كامل القطعة.

٨-٦-٢ خطوات العمل على برنامج ال Ansys:

لضمان نتائج محاكاة دقيقة على هذا البرنامج يجب الالتزام بخطوات الادخال على البرنامج وتحديد الشروط الحدية بدقة كتحديد أسطح التماس أو نقاط الارتكاز أو ردود الأفعال وغيرها من الشروط ويظهر الشكل رقم (٣٠,٥) تسلسل وخطوات العمل على هذا البرنامج للحصوا على النتائج المطلوبة.

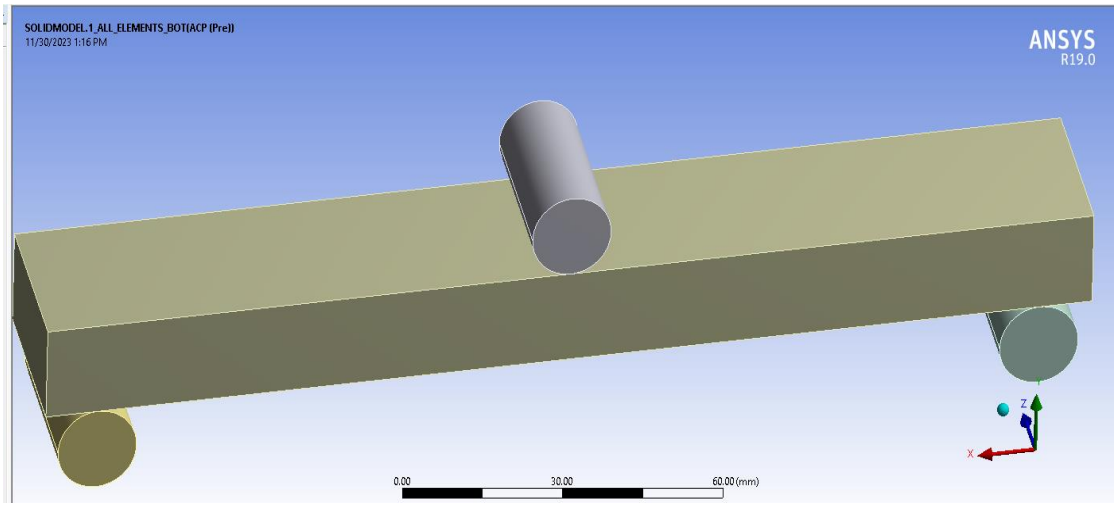


الشكل رقم (٣٠,٥): الخطوات المتسلسلة على البرنامج

❖ **تحديد الشكل من القسم Geometry**

من الممكن في هذا القسم من البرنامج إن نقوم برسم الأشكال الهندسية للقطع المراد تحليلها أو يمكن استيراد ملفات الأشكال الهندسية المرسومة في البرمجيات المخصصة للرسم مثل ال SolidWorks الذي جرى العمل عليه في هذا البحث أو برنامج AutoCAD وغيرها من البرامج المتوافقة مع برنامج ال Ansys.

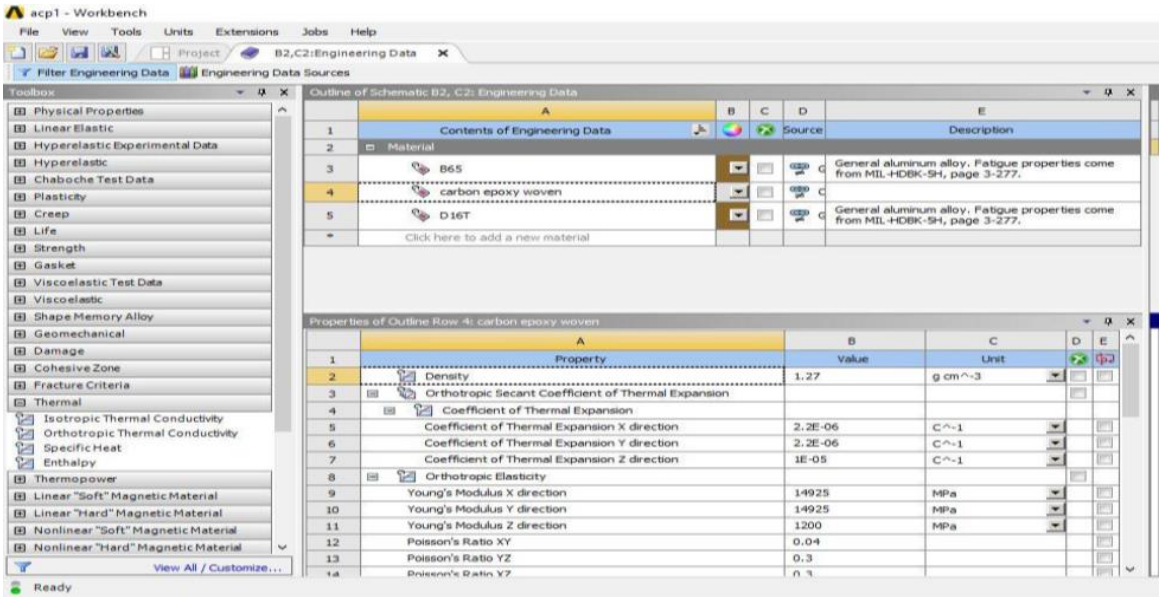
نقوم برسم الاشكال ثلاثية الأبعاد على برنامج الرسم الهندسي SolidWorks لعينات الشد والانحناء ونقوم بالاستدعاء من خلال هذه البيئة وسيتم التعامل بهذا الشكل في جميع المراحل اللاحقة، ويبين الشكل رقم (٣١,٥) الذي يظهر الشكل الخاص بعينة الانحناء.



الشكل رقم (٣١,٥): الذي يظهر الشكل الخاص بعينة الانحناء.

❖ المكتبة الهندسية (Engineering Data):

حيث يجري إدخال المواصفات الميكانيكية الأساسية للمواد الهندسية التي ستدخل في النموذج، وهي مادة الستريوبور حيث ندخل المعاملات الأساسية كما وردت في الجدول رقم(٣,٥)، وندخل خواص صفيحة المواد المركبة للأنواع الاربعة من الألياف، وقيم هذه الخواص هي قيم مأخوذة من دراسات مرجعية ومستنتجة من اختبار الشد ومشتقة من بعضها البعض بنسب تقريبية لذا فهي قيم تقريبية ويظهر الجدول رقم (١٣,٥) الخواص التقريبية لصفيحة المواد المركبة ذات الألياف الكربونية، ويوضح الشكل رقم (٣٢,٥) واجهة المكتبة الهندسية وإدخال الخواص للمادة المركبة.



الشكل رقم (٣٢,٥): واجهة المكتبة الهندسية

الجدول رقم (١٣,٥) الخواص التقريبية لصفيحة المواد المركبة ذات الألياف الكربونية[47]

1.27	ρ (gr/cm3)	
14000	E1(MPA)	
14000	E1(MPA)	
٢٩٠٠	E1(MPA)	
0.02	υ12	
0.3	υ13	
0.3	υ23	
4400	G12(MPA)	
800	G13(MPA)	
800	G23(MPA)	
450	١σ (Mpa)	Tensile Stress Limits
450	٢σ (Mpa)	
45	٣σ (Mpa)	
-400	١σ (Mpa)	Compressive Stress Limits
-400	٢σ (Mpa)	
-40	٣σ (Mpa)	
150	τ12 (Mpa)	Shear Stress Limits
50	τ13 (Mpa)	
50	τ23 (Mpa)	
0.06	١ε	Tensile Strain Limits
0.06	٢ε	
0.007	٣ε	
-0.06	١ε	Compressive Strain Limits
-0.06	٢ε	
-0.01	٣ε	
0.02	١٢γ	Shear Strain Limits
0.01	١٣γ	
0.01	٢٣γ	

❖ **تحديد الشروط الميكانيكية من خلال القسم Mechanical Model**

في هذا القسم يتم تحديد الشروط الحدية الميكانيكية والعناصر التي تخضع للقوى بكافة أنواع القوى أو ردود الفعل والاستناد والتماس وغيرها من الشروط، حيث نستدعي قائمتين من هذا القسم الأولى للجسم الذي سيخضع لحمولات الانحناء والثإنية للمسإند الميكانيكية ويتم العمل كالتالي:

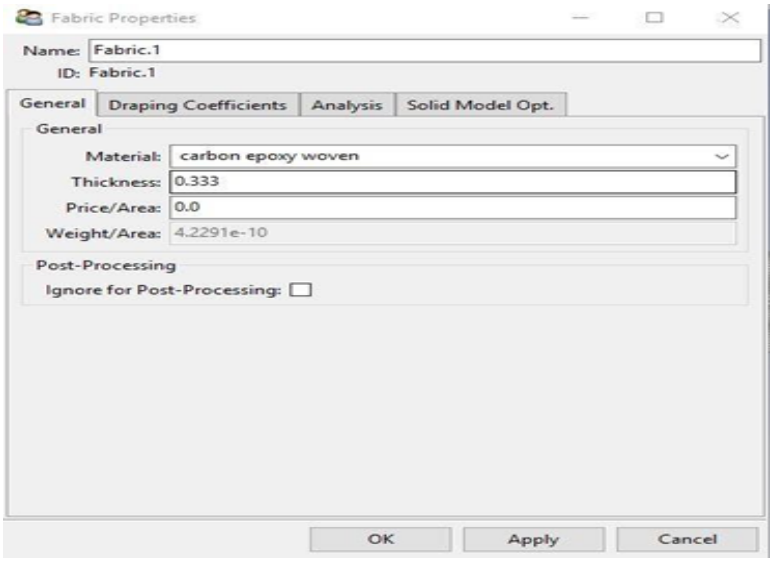
- نقوم بالربط بين القائمة (Engineering Data) الأساسية حيث قمنا بتعريف المواد في البداية مع الخيار Engineering Data الموجود في كل من القائمتين Mechanical Model.
- نقوم باستدعاء الشكل من الخيار Geometry في كل من القائمتين Mechanical Model ، ففي الأولى نحافظ على الجسم بدون المسإند وفي الثإنية نحافظ على المسإند بدون الجسم أي نقوم في كلتا القائمتين بحذف الأجسام التي لاتلزم في القائمة Mechanical Model.
- في الخيار Model في القائمة الأولى Mechanical Model الخاص بالجسم نقوم ب تقسيم الجسم إلى عناصر حجمية صغيرة من خلال التعليمة Mesh فيعمل البرنامج بطريقة العناصر المنتهية وكلما صغر حجم العنصر الثلاثي أو الرباعي تكون النتائج أدق والحل يستغرق زمنا أطول أثناء المعالجة ضمن الحاسب، وكذلك الأمر بالنسبة للقائمة Mechanical Model الخاصة بالمسإند نقوم بنفس الخطوات السابقة.

❖ **قسم تعريف المواد المركبة(pre)Acp**

يختص هذا القسم في تعريف معاملات المواد المركبة للقطع المكونة من أكثر من طبقة ألياف، حيث تعطي إمكإنية تعريف عدد الطبقات، وسماكة كل طبقة، وتوجه الألياف فيها، مما يمكن لاحقا بعد حل النموذج من إظهار نتائج كل طبقة على حده، ويحتاج العمل في هذه البيئة إلى عدة مراحل سنذكرها بالترتيب:

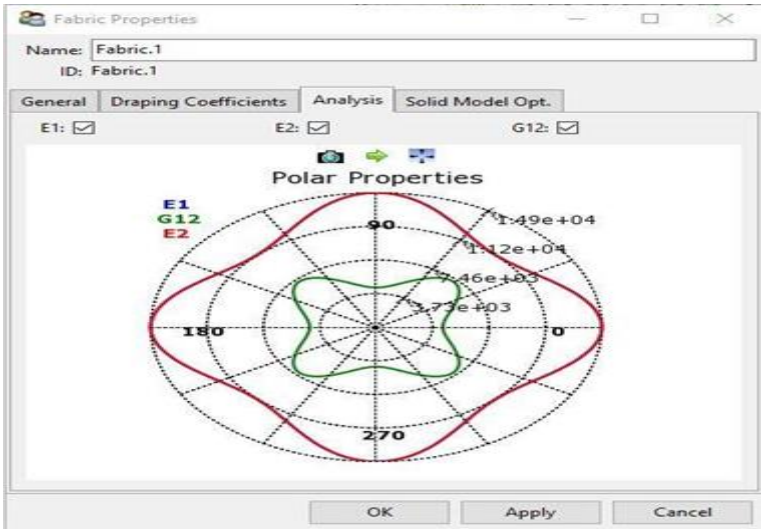
- نقوم بالربط بين الخيار Engineering Data من القائمة Mechanical Model الخاصة بالجسم مع الخيار Engineering Data ضمن القائمة Acp pre.
- نقوم بالربط بين الخيار Geometry من القائمة Mechanical Model الخاصة بالجسم مع الخيار Geometry ضمن القائمة Acp pre.
- نقوم بالربط بين الخيار Model من القائمة Mechanical Model الخاصة بالجسم مع الخيار Model ضمن القائمة Acp pre.

- الخيار Setup من القائمة Acp(pre): فيه يتم تنضيد الطبقات حيث يتم تحديد عدد الطبقات ونوع المادة واتجاه الألياف كما يظهر الشكل رقم () وتتم عملية ال Setup على عدة خطوات وهي:
- بيانات المواد (Materials Data): يتعرف البرنامج تلقائياً على المواد المدخلة في المكتبة الهندسية التي تم ادخالها في البداية ضمن Engineering Data.
- سماكة الطبقة الواحدة ومادتها من خيار Fabrics كما في الشكل رقم(٣٣,٥).



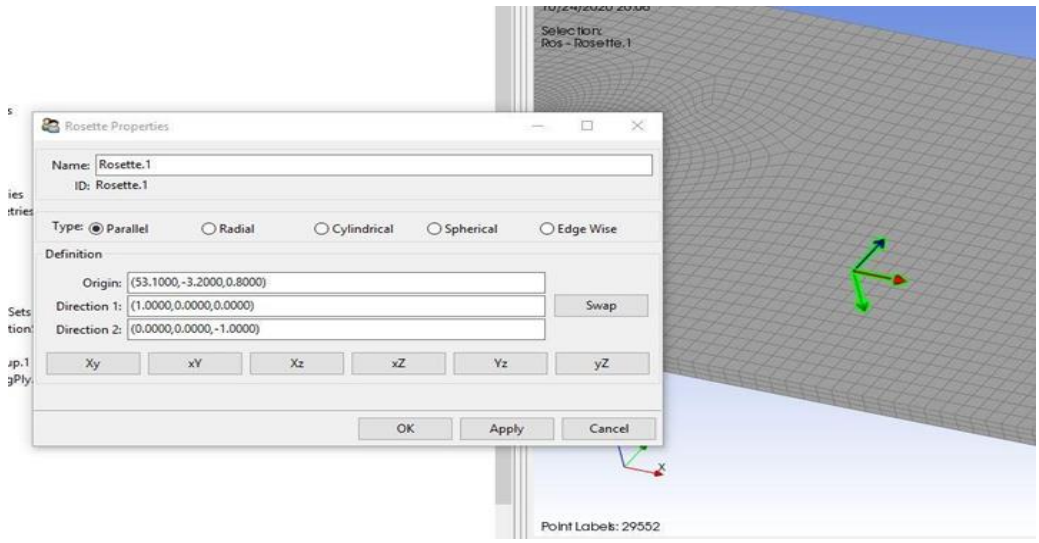
الشكل رقم (٣٣,٥): سماكة الطبقة الواحدة ومادتها

- من خيار (Analysis) في النافذة نفسها، يمكن إظهار المنحني القطبي لمعاملات يونغ ومعامل القص للمادة، كما في الشكل رقم (٣٤,٥).



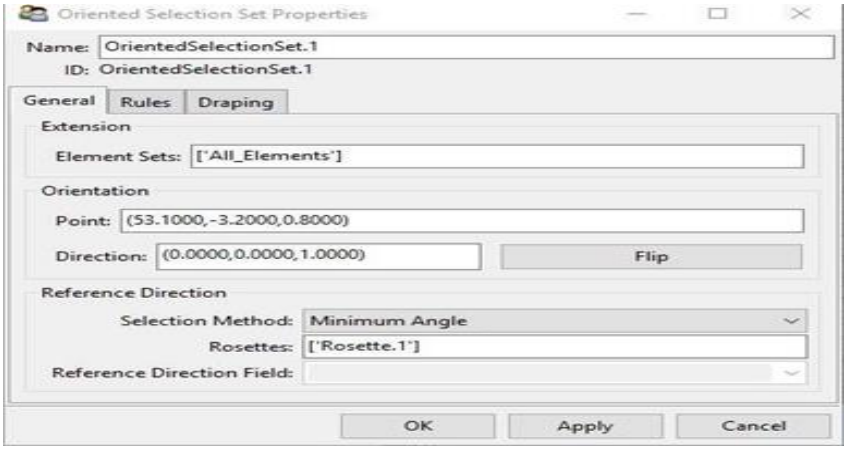
الشكل رقم (٣٤,٥): المنحني القطبي لمعاملات يونغ ومعامل القص للمادة

- في حال وجود أكثر من قطعة مواد مركبة في النموذج يمكن تجميع القطع متماثلة البنية في مجموعات من خلال خيار Element Sets حيث يتم تجميع القطع الثلاثة والتي هي الستريوبور وطبقتي المواد المركبة في الأعلى والأسفل لذا نختار الخيار All Elements.
- الخيار (Rosettes) : وفيه يتم تحديد جملة إحداثيات موضعية للصفيحة حيث يمثل الاتجاهين Y،X اتجاه الألياف، والاتجاه Y اتجاه التنضيد للطبقات كما هو موضح في الشكل رقم(٣٥,٥).



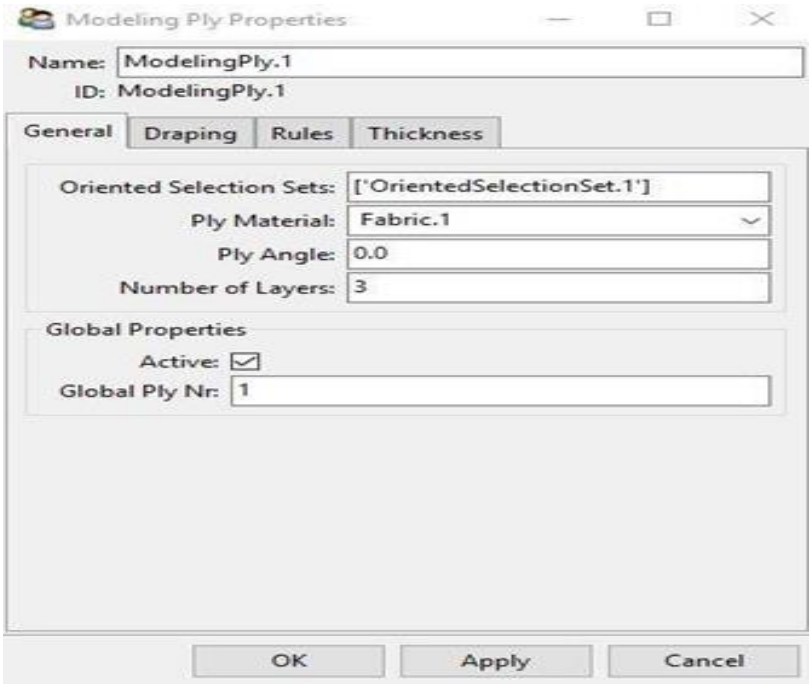
الشكل رقم (٣٥,٥): جملة الإحداثيات الموضعية

- الخيار (Oriented Selection Sets): يقوم هذا الخيار بتجميع العناصر التي تتبع التوجيه نفسه ونختار جملة الإحداثيات الحاكمة لها، كما في الشكل رقم (٣٦,٥).



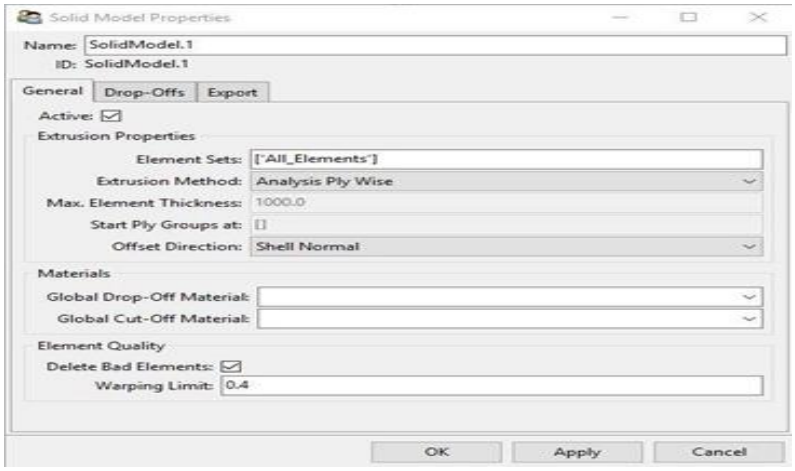
الشكل رقم (٣٦,٥): Selection Sets

- الخيار (Modeling Group): يجري اختيار عدد الطبقات التي تتبع مجموعة التوجه نفسه المحددة في الخطوة السابقة و ازوية إنح ارف الطبقة. تكرر هذه الخطوة حتى الوصول إلى عدد الطبقات والسماكة النهائية للقطعةن كما في الشكل رقم(٣٧,٥).



الشكل رقم (٣٧,٥): تحديد عدد الطبقات

- الخيار(Solid Model): في هذا الخيار يتم تحوبا الجسم إلى جسم صلب من الطبقات المنضدة ليتعرف البرنامج علية كجسم صلب كما في الشكل رقم (٣٨,٥).

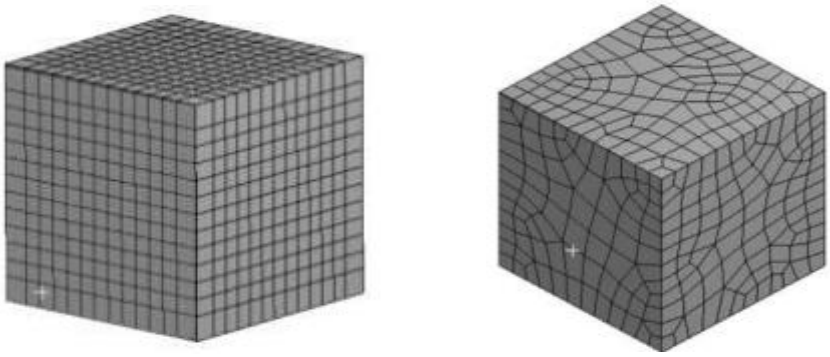


الشكل رقم (٣٨,٥): تكوين الجسم الصلب

❖ **القسم Static Structure**

في هذا القسم هناك مجموعة من الخيارات والتي تستفيد من الادخالات في القوائم السابقة كنوع المادة والتنضيد والتقطيع وغيرها، يتم العمل بهذه القائمة على عدة خطوات وهي:

- الربط بين الخيار Model من القائمة Mechanical Model الخاصة بالمساند مع الخيار Model من القائمة Static Structure .
- الربط بين الخيار setup من القائمة Acp(pre) الخاصة بالمواد المركبة والتنضيد مع الخيار Model من القائمة Static Structure .
- الخيار(Mech) : يتم من خلاله تقطيع الجسم إلى عناصر متناهية في الصغر وبأحجام صغيرة يمكن التحكم بحجمها من خيارات التعليمة، ويتم اختيار نوع العنصر المنتهي من الخيار Method من القائمة Mech ثم اختيار Mapped Mech Type ثم نختار Hexa وضمنه عدة أنواع للعناصر ومنها Tetraherons, Sweep, Hexdomint, Cartesiam, Multizone ونختار العنصر Hexahedron والذي يعتبر من أفضل أنواع عناصر التقسيم ب الـMech ويمكن استخدامه في تطبيقات كثيرة من تطبيقات الـ Ansys ويكون له شكل منتظم بحيث يسهل الحل ويقلل وقت الحل في المسائل الصعبة، ففي بحثنا هذا نختا حجم العنصر المنتهي 1mm للاختبارين الشد والانحناء وبعدد عقد ٢٥٥٠ وعدد عناصر١٩٥٢ لاختبار الشد، و٤٥٨٠ عقدة و٣٧٩٠عنصر لاختبار الانحناء ، ومن الجدير بالذكر أنه يطرأ تغيير في النتائج عندما نغير نوع النصر والحجم وعدد العقد وعدد العناصر، والشكل رقم (٣٩,٥) بعض أنواع العناصر المنتهية في البرنامج[28].



b a

الشكل رقم (٣٩,٥): أنواع العناصر المنتهية:

Cartesian (b Hexdomainant (a

- الخيار(setup): نقوم من خلال هذا الخيار تحديد نوع التماس بين المساند والجسم من خلال قائمة connection ونختاره كاحتكاك وبعامل احتكاك تلقائي يأخذه البرنامج 0.18، ونحدد أيضا ضمن هذا الخيار نوع الحمولة المطبقة والسطح المطبقة عليها وفي بحثنا هذا نختار تثبيت المسندين الجإنبيين وتطبيق الحمولة على مسند المنتصف لمحاكاة عملية الانحناء.
- الخيار (Solution): تحديد النتائج المطلوب إظهارها بعد الحل وإضافة النتائج الأخرى المرغوبة من خلال هذا الخيار، وفي بحثنا هذا تمت إضافة عدة خواص محسوبة من قبل البرنامج المستخدم مثل التشوه الإجمالي للعينة (Total Deformation) والإجهادات الأساسية الاعظمية (Maximum Principal Stress) والانفعالات الأعظمية (Maximum strains) وإجهادات القص الأعظمية (Maximum Shear Stress) وأداة تحليل انهيار المواد المركبة (Composite Failure Tool) والتي تمكن من تحديد معايير انهيار المواد المركبة المدروسة، فهي تضم معيار الإجهاد الأعظمي ومعيار الانفعال الأعظمي ومعيار Tsai– Wu ومعيار Tsai–Hill ومعيار Hoffman ومعيار Hashin ومعيار Puck ومعيارLaRk ومعيار Cuntze كما يوضح الشكل رقم (٤٠,٥).

Details of "Composite Failure Tool"	
Defined By	Direct Input
Reinforced Ply Criteria	
Maximum Strain	Off
Maximum Stress	Off
Tsai-Wu	On
Tsai-Hill	Off
Hoffman	Off
Hashin	Off
Puck	Off
LaRC	Off
Cuntze	Off

الشكل رقم (٤٠,٥): معايير إنهيار المواد المركبة في البرنامج

وبهذا الشكل نكون قدمنا شرح تفصيلي لطريقة العمل بهذا البرنامج المستخدم في هذا البحث، حيث أشرنا إلى أبرز الخطوات المتبعة لانجاز المحاكاة بنجاح والحصول على نتائج دقيقة إلى أقصى حد ممكن ويجب التنويه أنه يمكن

استخدام نفس البرامج المعد في دراستنا لدراسات مشابهه وتختلف بالقوة المطبقة أو الشروط الحدية أو المواد الداخلة في تكوين المركب الهيكلي.

الفصل السادس: النتائج والمناقشة

The Results and Discussion

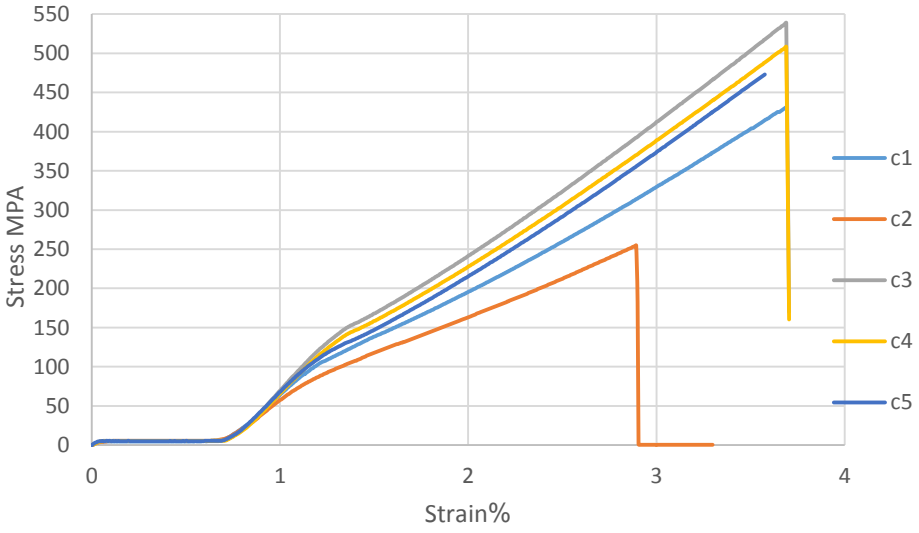
٦-١ تمهيد (PREFACE)

قمنا في هذا البحث بإجراء اختبارات على العينات التي تم تصنيعها بالورش المحلية لإنتاج صفائح المواد المركبة باستخدام الألياف الصناعية المذكورة سابقا بالإضافة إلى الراتنجات المتوفرة محليا، وفي هذا الفصل تم عرض بشكل تفصيلي لجملة النتائج التي تمت في الفصل السابق والتنويه لبعض المقارنات بين الدراسة التجريبية والدراسة العددية.

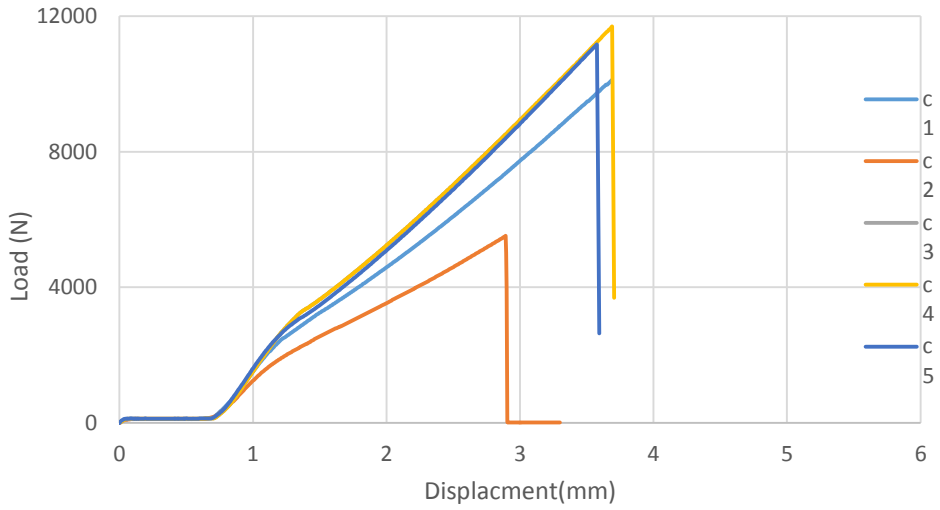
٦-٢ نتائج اختبار الشد

٦-٢-١ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي-كربون (C)

جرى اختبار الشد لـ 5 عينات تتكون من ثلاث طبقات من ألياف الكربون مع الإيبوكسي، حيث بلغت سماكة الصفيحة 1mm تقريبا، ويظهر الشكل رقم (١,٦) مخطط بيإني للاستطالة مع الاجهاد الناتج عن الاختبار التجريبي الحاصل في المخبر لهذه العينات، ويبين الشكل رقم (٢,٦) مخطط الاستطالة-القوة لهذه العينات، أما الجدول رقم (١,٦) يبين الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على هذا النوع من العينات.



الشكل رقم (١,٦): مخطط انفعال-اجهاد لعينات الكربون



الشكل رقم (٢,٦): مخطط استطالة–حمولة لعينات الكربون

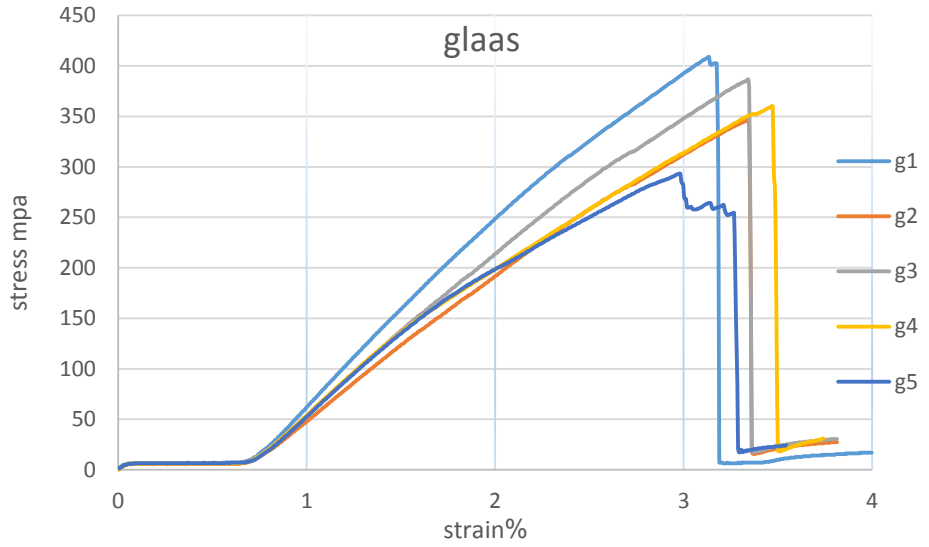
الجدول رقم (١,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الكربون

عينات الشد (carbon)	مقاومة الشد الأعظمية(Mpa)	التشوه الأعظمي	معامل يونغ E (Mpa)
C1	٤٣٠,٩٥٤	3.7	١٤٥٢٠
C2	225.01	2.9	١٢٣٣٠
C3	539.792	3.6	١٤٩٠٠
C4	411.104	3.6	١٣٥٠٠
C5	472.914	3.5	١٤١٥٥
المتوسط الحسابي	415.95	3.46	١٣٨٨١
الإنحراف المعياري	105.155	0.28	202.2

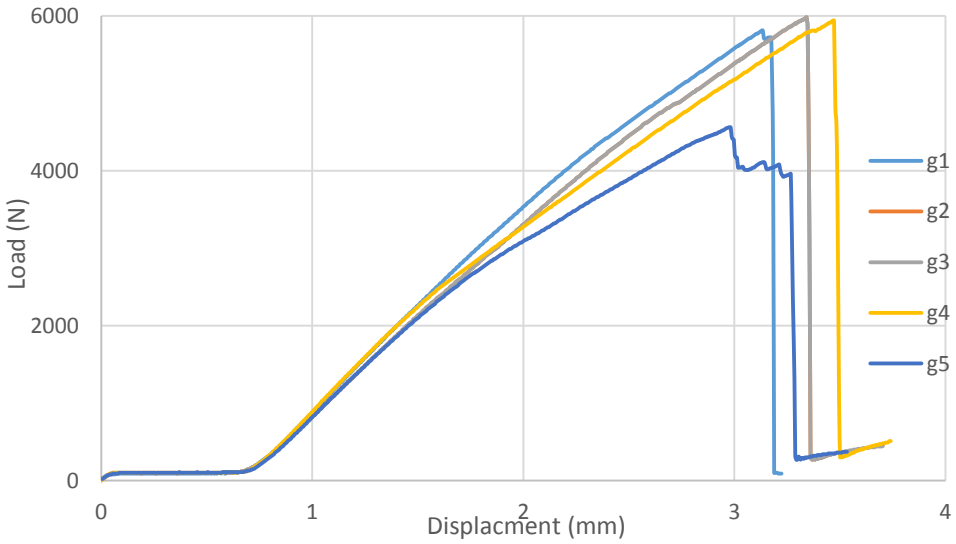
٦-٢-٢ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي–زجاج (G)

جرى اختبار الشد لـ 5 عينات تتكون من ثلاث طبقات من ألياف الزجاج مع الإيبوكسي، حيث بلغت سماكة الصفيحة 1mm تقريبا، ويظهر الشكل رقم (٣,٦) مخطط بيإني استطالة مع الاجهاد الناتج عن الاختبار التجريبي

الحاصل في المخبر لهه العينات، ويبين الشكل رقم (٤,٦) مخطط الاستطالة–القوة لهذه العينات، أما الجدول رقم (٢,٦) يبين الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على هذا النوع من العينات.



الشكل رقم (٣,٦): مخطط الانفعال–الاجهاد لعينات الزجاج



الشكل رقم (٤,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الزجاج

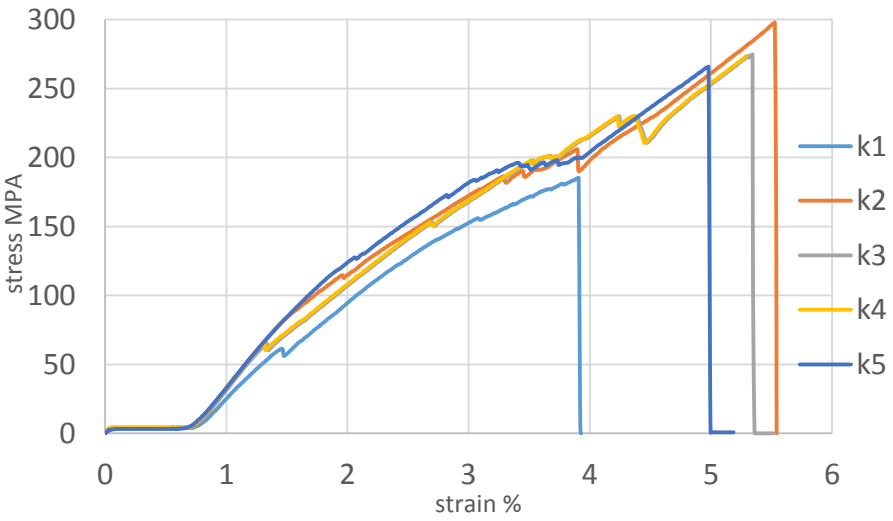
الجدول رقم (٢,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الزجاج

عينات الشد (glass)	مقاومة الشد الأعظمية(Mpa)	التشوه الأعظمي	معامل يونغ E (Mpa)
G1	408.867	3.3	10416.6
G2	346.848	3.4	8678.5

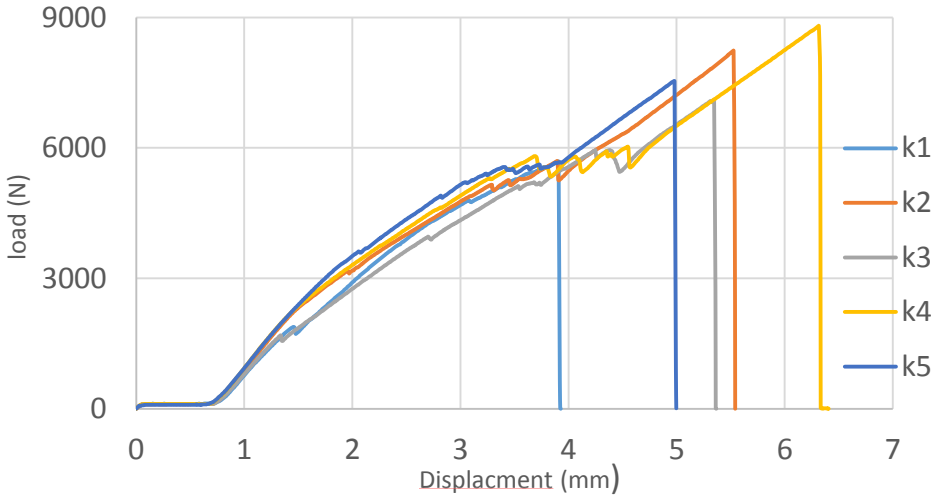
G3	346.555	3.45	9962
G4	360.207	3.5	5774.19
G5	293.159	3.3	6104
المتوسط الحسابي	351.12	3.39	8187.05
الإنحراف المعياري	36.92	0.08	1913.13

٦-٢-٣ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي-كيفلر (K)

جرى اختبار الشد لـ 5 عينات تتكون من ثلاث طبقات من ألياف الكيفلر مع الإيبوكسي، حيث بلغت سماكة الصفيحة 1mm تقريبا، ويظهر الشكل رقم (٥,٦) مخطط بيإني الاستطالة-الاجهاد الناتج عن الاختبار التجريبي الحاصل في المخبر لهه العينات، ويبين الشكل رقم (٦,٦) مخطط الاستطالة-القوة لهذه العينات، أما الجدول رقم (٣,٦) يبين الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على هذا النوع من العينات.



الشكل رقم (٥,٦): مخطط الانفعال-الاجهاد لعينات الكيفلر



الشكل رقم (٦,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الكيفلر

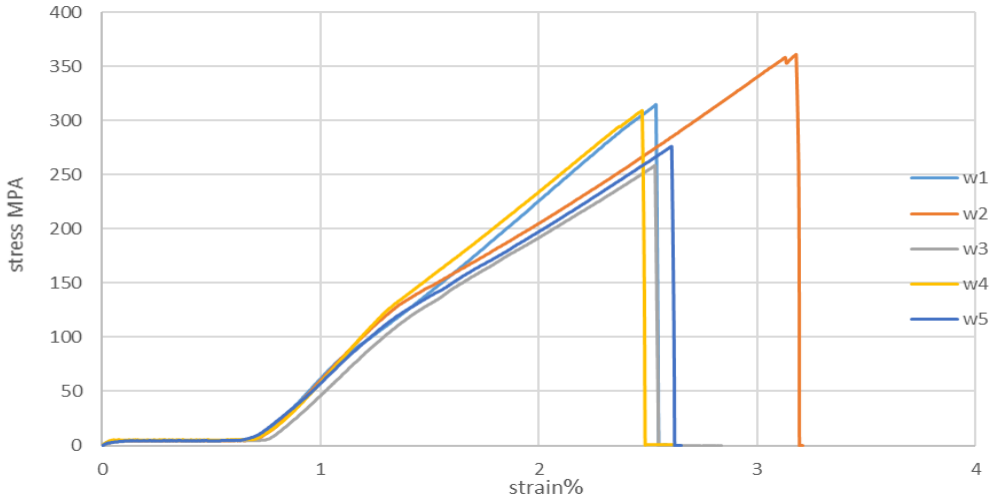
الجدول رقم (٣,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الكيفلر

عينات الشد (kevlar)	مقاومة الشد الأعظمية(Mpa)	التشوه الأعظمي	معامل يونغ E (Mpa)
K1	185.221	3.9	5625
K2	297.999	5.5	٦٩٠٠
K3	274.763	5.4	٦٥٠٠
K4	319.337	5.3	٥٩٩٠
K5	265.877	5	٤٨٨٠
المتوسط الحسابي	268.63	5.02	٥٩٧٩
الإنحراف المعياري	45.8	0.58	1566

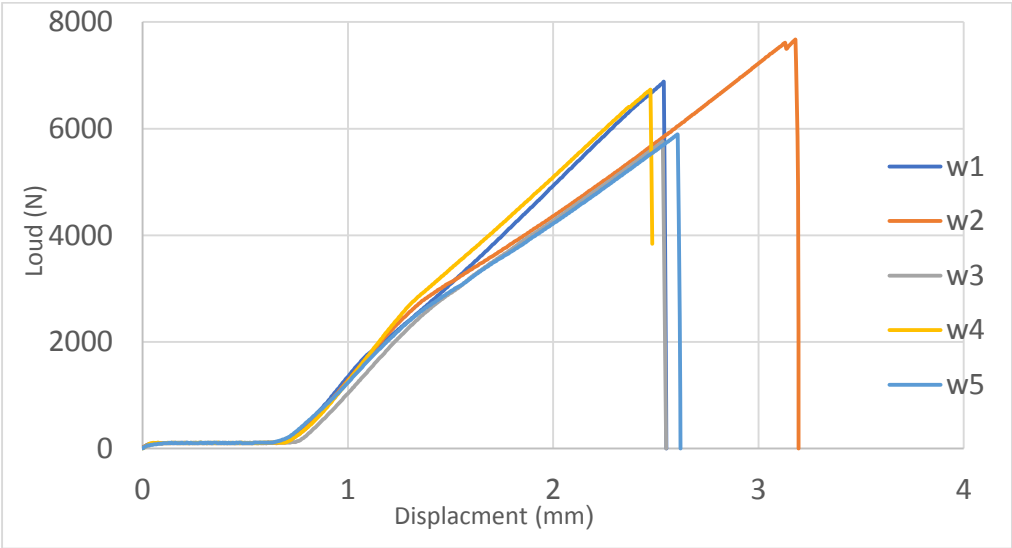
٦–٢–٤ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي–هجين (W)

جرى اختبار الشد لـ 5 عينات تتكون من ثلاث طبقات من ألياف الهجين (كربون–كيفلر) مع الإيبوكسي، حيث بلغت سماكة الصفيحة 1mm تقريبا، ويظهر الشكل رقم (٧,٦) مخطط بيإني استطالة مع الاجهاد الناتج عن

الاختبار التجريبي الحاصل في المخبر لهه العينات، ويبين الشكل رقم (٨,٦) مخطط الاستطالة–القوة لهذه العينات، أما الجدول رقم (٤,٦) يبين الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على هذا النوع من العينات.



الشكل رقم (٧,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الهجين



الشكل رقم (٨,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الهجين

الجدول رقم (٤,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الهجين

عينات الشد (woven)	مقاومة الشد الأعظمية(Mpa)	التشوه الأعظمي	معامل يونغ E (Mpa)
W1	314.589	2.55	11810.5

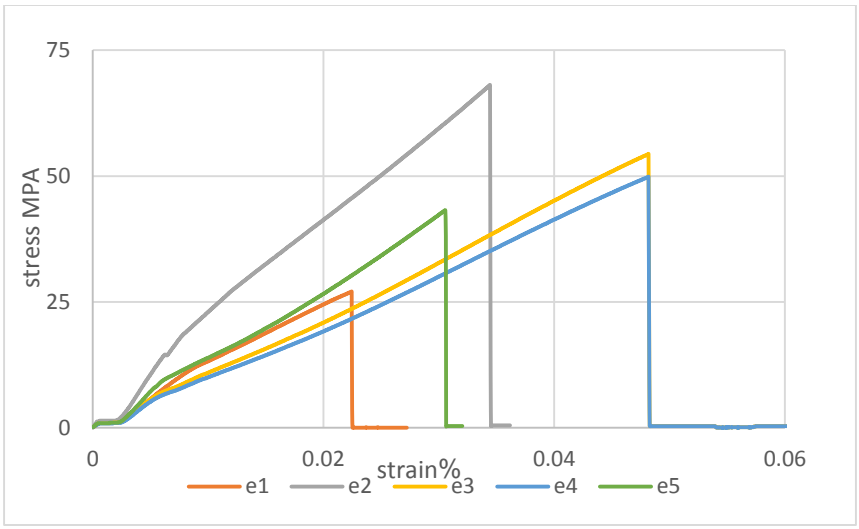
W2	361.489	3.2	9475
W3	258.776	2.5	9838
W4	309.511	2.4	11928.2
W5	276.44	2.5	8771
المتوسط الحسابي	304.161	2.63	10364.54
الانحراف المعياري	35.361	0.28	٢٨٥٣

٦-٢-٥ نتائج اختبار الشد لعينات إيبوكسي-هجين (W)

بعد تصنيع عينات الإيبوكسي واختبارها تم الحصول على النتائج التالية:

الجدول رقم (٤,٦): الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد على عينات الإيبوكسي

عينات الإيبوكسي	الحمولة الاعظمية (N)	الاستطالة عند اعظم حمولة (mm)	الاجهاد الأعظمي (Mpa)
E1	2600	2.4	26
E2	4350	3.2	65
E3	4780	5	55
E4	4790	5	50
E5	3430	3.3	40
المتوسط الحسابي	3990	3.3	53
الإنحراف المعياري	847.34	1.148	14.52

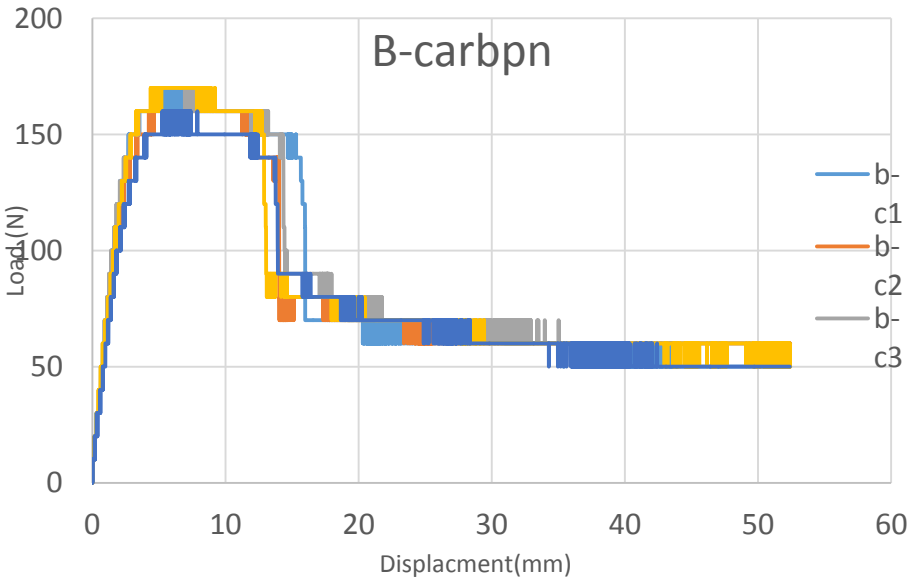


الشكل رقم (٩,٦): مخطط الاستطالة–الاجهاد لعينات الإيبوكسي

٦–٣ نتائج اختبار الانحناء

٦–٣–١ نتائج اختبار الانحناء لعينات الستريوبور المدعم بصفائح إيبوكسي–كربون (B–C)

جرى اختبار الانحناء لـ 5 عينات من هذا النوع من العينات والشكل رقم (٩,٦) يوضح الخطوط البيانية استطالة–حمولة لعينات هذه المجموعة، أما الجدول رقم (٥,٦) يبين الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الانحناء على هذا النوع من العينات.



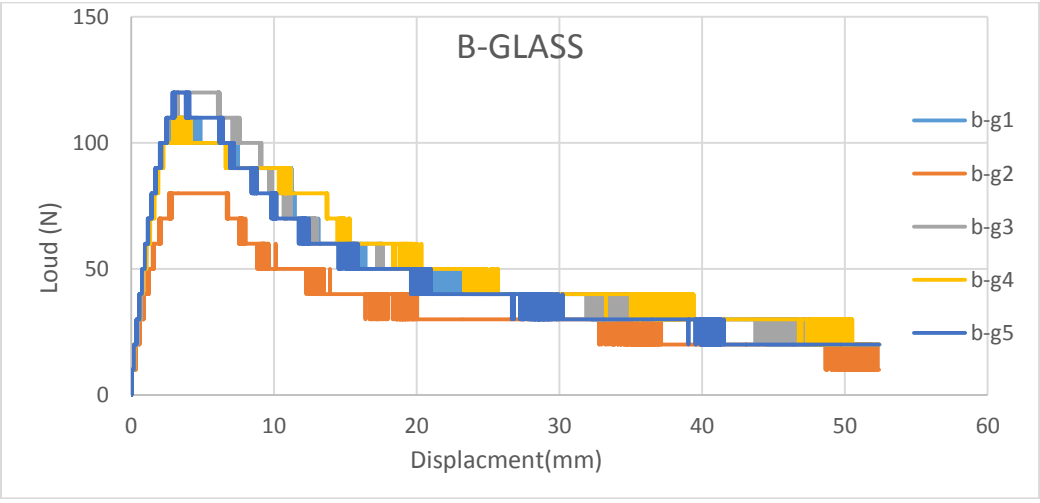
الشكل رقم (٩,٦): مخطط الاستطالة مع الحمولة لاختبارالانحناء لعينات B–C

الجدول رقم (٥,٦): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الانحناء للعينات B–C

عينات الشد (carbon)	الحمولة الاعظمية (N)	الاستطالة عند اعظم حمولة(mm)
Bc1	١٧٠	٦,٥٦
Bc2	١٦٠	٦,٧
Bc3	١٧٠	٦,٣
Bc4	١٧٠	٦
Bc5	١٦٠	٦,٦
المتوسط الحسابي	166	٦,٤
الإنحراف المعياري	4.89	0.25

٦–٣–٢ نتائج اختبار الانحناء لعينات الستريوبور المدعم بصفائح إيبوكسي–زجاج (B–G)

جرى اختبار الانحناء لـ 5 عينات من هذا النوع من العينات والشكل رقم (١٠,٦) يوضح الخطوط البيانية استطالة–حمولة لعينات هذه المجموعة، أما الجدول رقم (٦,٦) يبين الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الانحناء على هذا النوع من العينات.



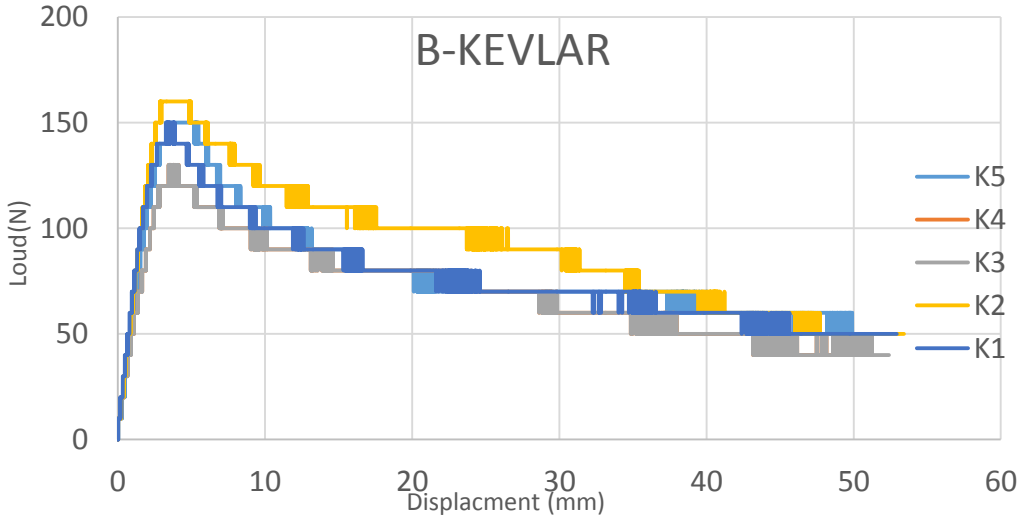
الشكل رقم (١٠,٦): مخطط الاستطالة مع الحمولة لاختبارالانحناء لعينات B–G

الجدول رقم (٦,٦): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الانحناء للعينات B-G

عينات الانحناء (glass)	الحمولة الاعظمية(N)	الاستطالة عند اعظم حمولة (mm)
Bg1	١١٠	3.7
Bg2	٨٠	3.5
Bg3	١٢٠	٤,١
Bg4	١١٠	٣,٧
Bg5	١٢٠	٤,٧
المتوسط الحسابي	108	٣,٩٢
الإنحراف المعياري	14.6	0.42

٦-٣-٣ نتائج اختبار الانحناء لعينات الستريوبور المدعم بصفائح إيبوكسي-كيفلر (B-K)

جرى اختبار الانحناء لـ 5 عينات من هذا النوع من العينات والشكل رقم (١١,٦) يوضح الخطوط البيانية استطالة-حمولة لعينات هذه المجموعة، أما الجدول رقم (٧,٦) يبين الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الانحناء على هذا النوع من العينات.



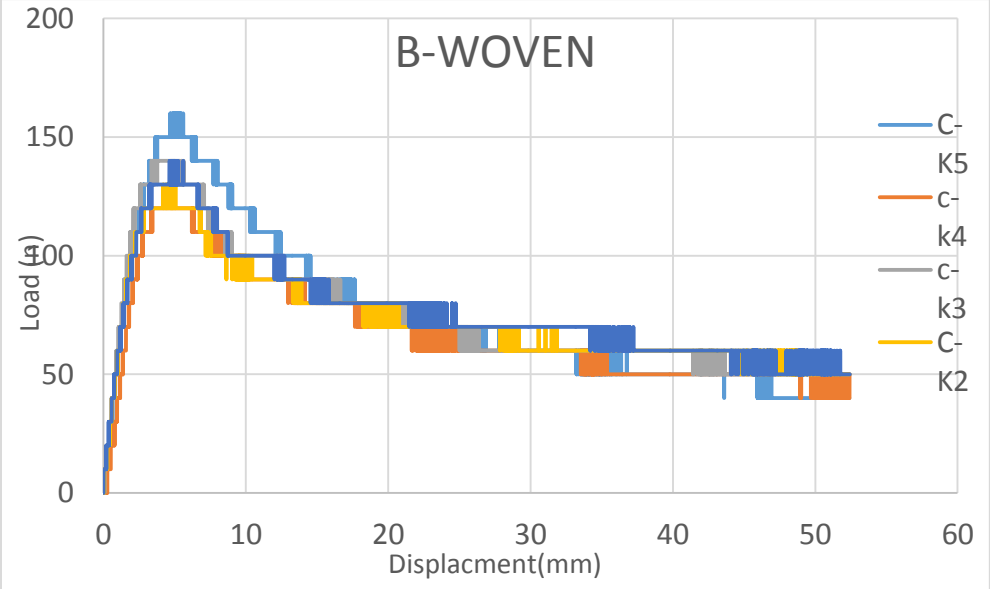
الشكل رقم (١١,٦): مخطط الاستطالة-الحمولة الناتج عن اختبار الانحناء لعينات B-K

الجدول رقم (٧,٦): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الانحناء للعينات B–K

عينات الانحناء (kevlar)	الحمولة الاعظمية(N)	الاستطالة عند اعظم حمولة (mm)
Bk1	١٥٠	٥,١
Bk2	١٦٠	٤,٩
Bk3	١٣٠	٥
Bk4	١١٠	٤,٨
Bk5	١٥٠	٥,٥
المتوسط الحسابي	140	٥,٠٦
الانحراف المعياري	17.88	0.24

٦–٣–٤ نتائج اختبار الانحناء لعينات الستريوبور المدعم بصفائح إيبوكسي–هجين (B–W)

جرى اختبار الانحناء لـ 5 عينات من هذا النوع من العينات والشكل رقم (١٢,٦) يوضح الخطوط البيانية استطالة–حمولة لعينات هذه المجموعة، أما الجدول رقم (٨,٦) يبين الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الانحناء على هذا النوع من العينات.



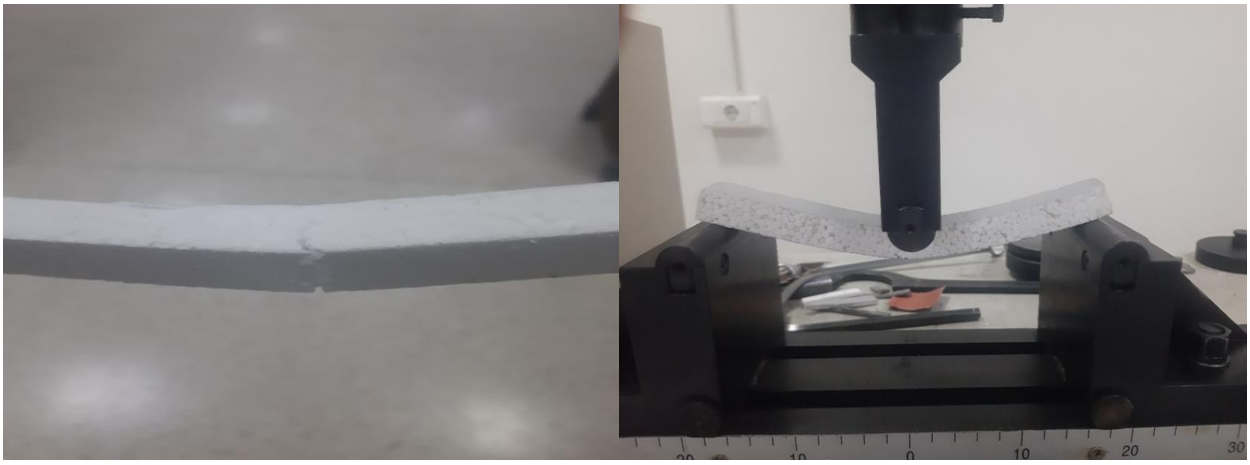
الشكل رقم (١٢,٦): مخطط الاستطالة–الحمولة لاختبار الانحناء لعينات B–W

الجدول رقم (٨,٦): الخواص الميكانيكية الناتجة عن اختبار الانحناء للعينات B-W

عينات الانحناء (Woven)	الحمولة الاعظمية(N)	الاستطالة عند اعظم حمولة (mm)
Bw1	130	٥,٤
Bw2	120	٥,٥
Bw3	140	٤,٨
Bw4	120	٤,٩
Bw5	١٥٠	٤,٨
المتوسط الحسابي	132	٥,٣٢
الإنحراف المعياري	11.06	0.38

٦-٣-٥ اختبارالانحناء على الستريوبور

جرى اختبار الانحناء على الة اختبار الشد حيث لم تتجأوز القيمة الأعظمية 10KN أقل من خطأ الالة ولم تعطي نتائج واضحة لذا لم نتمكن من استخراج بيانات من الة الاختبار وتسجيل النتائج، ويلزم لتنفيذ هذا الاختبار آلة مناسبة بحمولة أعظمية مناسبة أقل بكثير من الالة المتوفرة لدينا في مخبر الاختبارات الميكانيكية، ويوضح الشكل رقم (١٣,٦) اختبار الانحناء لعينة الستريوبور حسب المواصفة القياسية العالمية رقم .

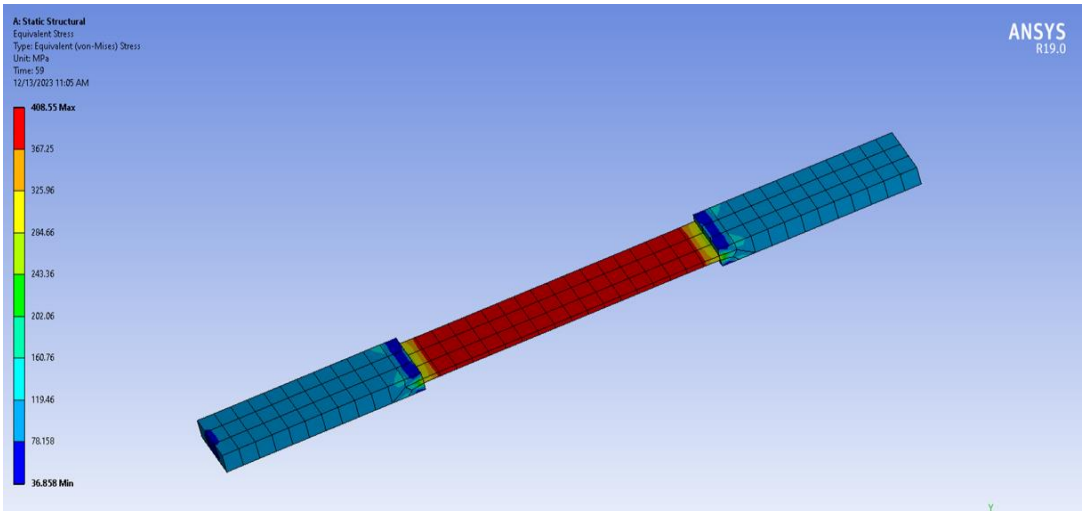


الشكل رقم(١٣,٦): اختبار الإنحناء للستريوبور

٦-٤ نتائج النمذجة العددية على برنامج ANSYS

٦-٤-١ نتائج النمذجة لاختبار الشد

تم إجراء اختبار الشد بناء على النتائج التجريبية واستنادا على الخواص الميكانيكية التقريبية من الدراسات السابقة، نفذت المحاكاة على الأربع عينات الشد حيث أخذنا وطبقنا القوة الأعظمية لكل نوع من أنواع صفائح المواد المركبة من النتائج التجريبية المذكورة سابقا، وتم الحصول على نتائج عددية قريبة من النتائج التجريبية مع اختلافات في بعض العينات التجريبية، يبين الشكل رقم (١٤,٦) اختبار الشد على برنامج ansys لعينة كربون عند التحميل بقوة شد 10425N.



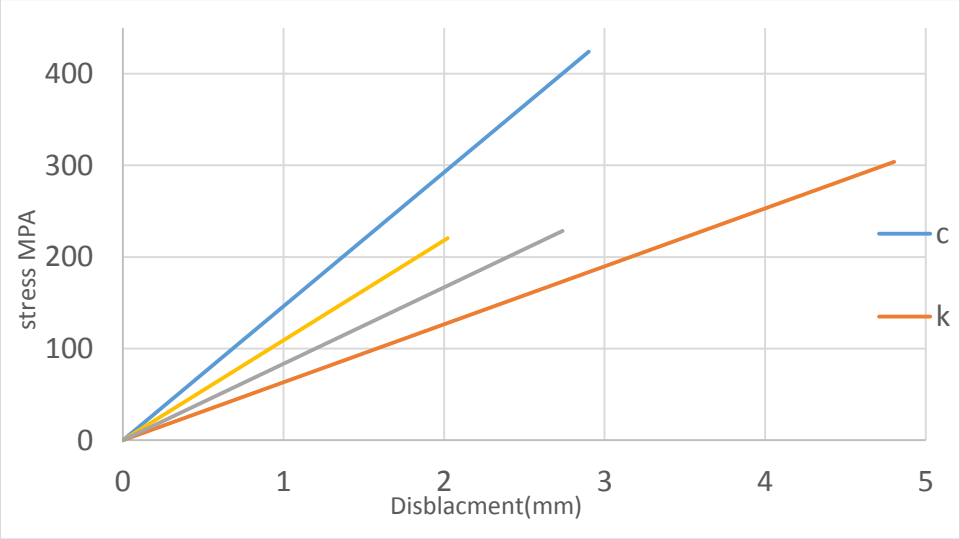
الشكل رقم (١٤,٦): نمذجة الشد لعينة الكربون

بنفس طريقة المحاكاة التي جرت على عينة الكربون الواردة في الشكل السابق جرى محاكاة العينات الأخرى من أنواع الألياف المتبقية وكإنت النتائج كما وردت في الجدول رقم (٩,٦).

الجدول رقم (٩,٦) الخواص الميكانيكية الناتجة عن المحاكاة للعينات

عينات الشد	الاجهاد الاعظمي تحليليا (Mpa)	الاستطالة الاعظمية تحليليا (mm)
الكربون	٤٢٤,١٥	٢,٩
الزجاج	٢٢٨,٤	٢,٧٣
الكيفلر	٣٠٣,٨	٤,٨
الهجين	٢٢٠,٥	٢,٠٢

ويمثل الشكل رقم (١٥,٦) الخطوط البيانية في منطقة المرونة قبل الإنهيار للأربع عينات بالاعتماد على بيانات البرنامج بعد تطبيق الحمولات الأعظمية للإنهيار المأخوذه من البيانات التجريبية والمذكورة سابقا.

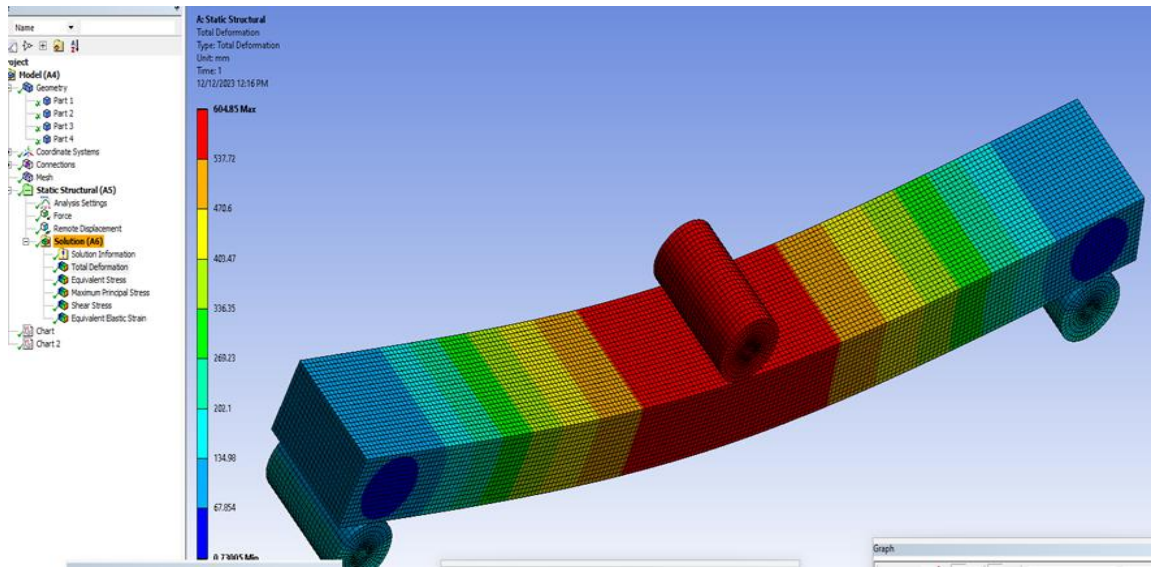


الشكل رقم(١٥,٦): منحنيات العينات الأربعة ضمن مجال المرونة

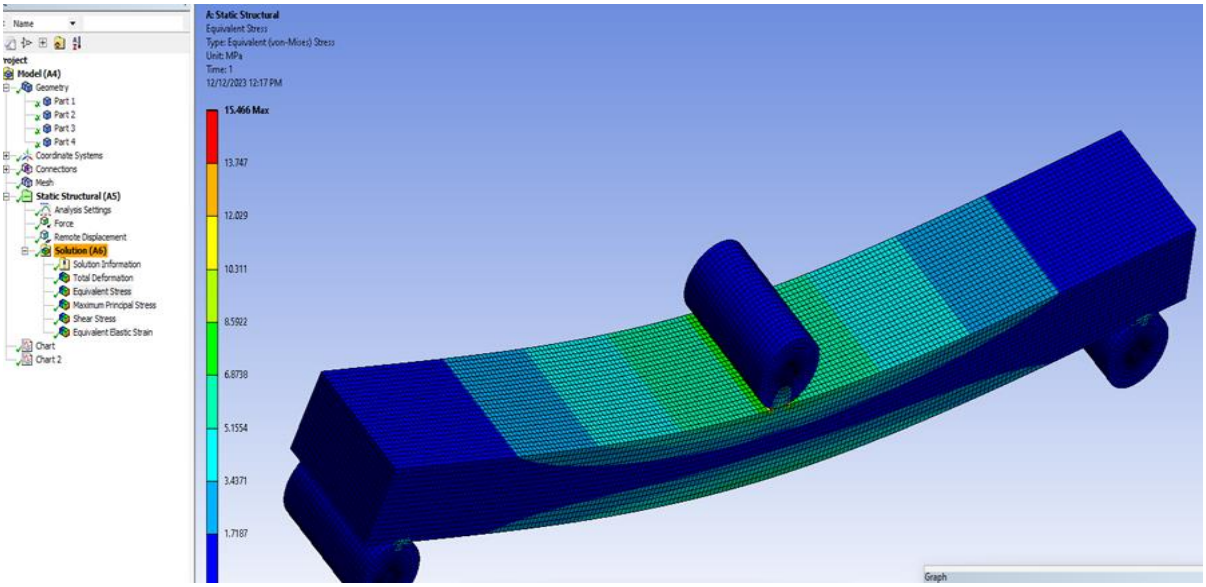
٦-٤-٢ نمذجة اختبار الانحناء على برنامج الـ Ansys

- **نتائج نمذجة طبقة الستريوبور بدون تدعيم بالألياف**

تمت دراسة ونمذجة طبقة الستريوبور بمفردها دون تدعيم بصفائح المواد المركبة ودراسة الاستطالة الكلية ويبينها الشكل رقم (١٦,٦) والاجهادات الناتجة عن النمذجه والموضحة في الشكل رقم (١٧,٦) وتسجيل النتائج كما وردت في الجدول رقم (١٠,٦)، وهنا لم يحدث مقارنة لإننا لم نتمكن من إجراء اختبار الانحناء على الستريوبور لعدم توفر الالة المناسبة كما ذكرنا سابقا.



الشكل رقم (١٦,٦): الاستطالة الكلية للستريوبور



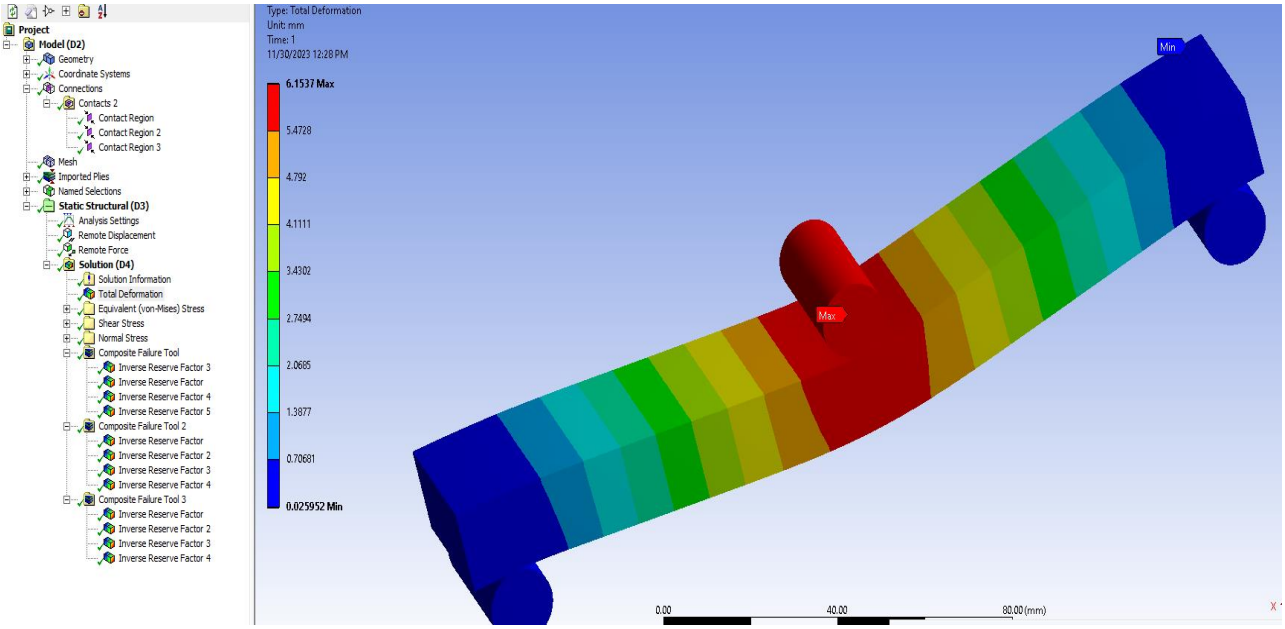
الشكل رقم (١٧,٦): الاجهادات الناتجة عن حمولة الانحناء للستريوبور

الجدول رقم (١٠,٦): الخواص الميكانيكية للإنحناء للستريوبور

العينة	سهم الانحناء(mm)	اجهاد أعظمي (Mpa)	انفعال أعظمي
ستريوبور بدون تدعيم بصفائح المواد المرمبة البولميرية	60.4	15.4	3.5

- **نتائج الاستطالة الكلية للنمذجة لعينات الانحناء.**

جرى في هذا البحث أيضا دراسة الاسطالة الكلية الناتجة عن النمذجة لعينات الانحناء المدعمة بصفائح المواد المركبة المختلفة التركيب المستخدمة في هذا البحث، ويوضح الشكل رقم (١٨,٦) الاستطالة الكلية لعينة الكربون تحت تطبيق قوة مقدارها 166N وهي الحمولة التي تم عندها إنهيار العينة تجريبيا.



الشكل رقم (١٨,٦): الاستطالة الكلية لإنحناء عينة الكربون

وبنفس الطريقة تم نمذجة وتسجيل النتائج لباقي العينات التي تستخدم ألياف الكيفلر والزجاج والهجين في التدعيم وكانت النتائج المبينة في الجدول رقم (١١,٦).

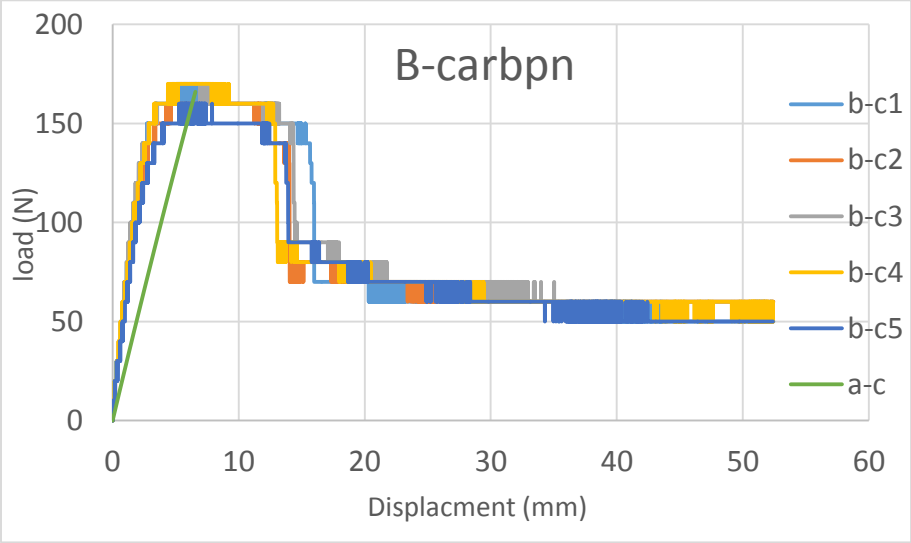
الجدول رقم (١١,٦): الاستطالة الكلية للإنحناء للعينات الاربعة

العينة	كربون	زجاج	كيفلر	هجين
الاستطالة التحليلية عند اعظم حمولة تجريبية (mm)	٦,١٥	٤,٤٢	٥,٩٠	٥,١١

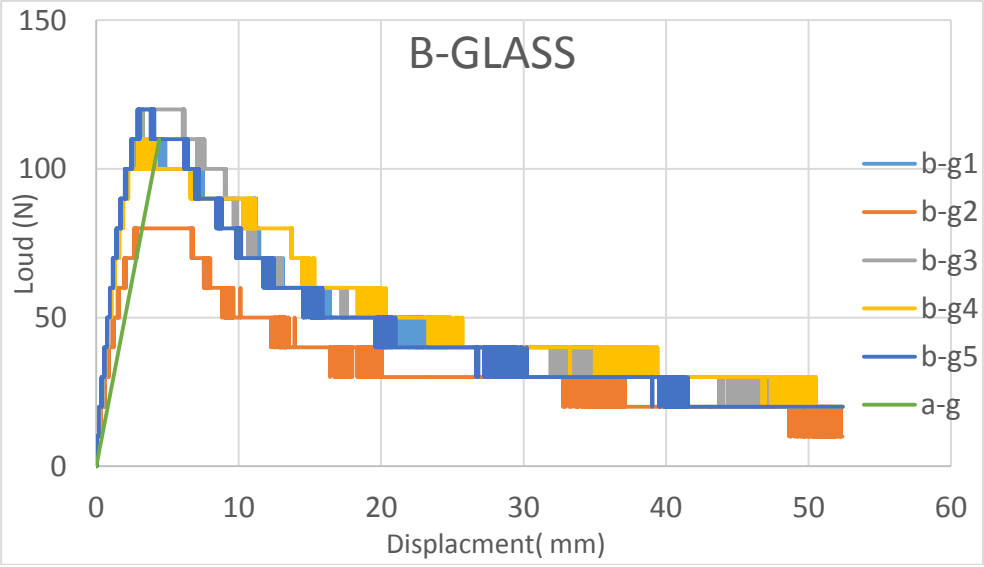
٦-٤-٣ المنحنيات الناتجة عن النمذجة في الانحناء

تم رسم المنحني بين الاستطالة وقوة الإنهيار المأخوذه من البيانات التجريبية لكل العينات المستخدمة باختلاف أنواع الألياف الداخلة في التدعيم سواءا كربون أو كيفلر أو زجاج أو هجين ومقارنتها مع المنحنيات التجريبية لنفس العينات، والشكل رقم (١٩,٦) يبين المنحنيات التجريبية الخمسة مع المنحني الناتج عن النمذجة لعينة الستريوبور المدعم بصفائح الكربون، والشكل رقم (٢٠,٦) يبين المنحنيات التجريبية الخمسة مع المنحني الناتج عن النمذجة لعينة

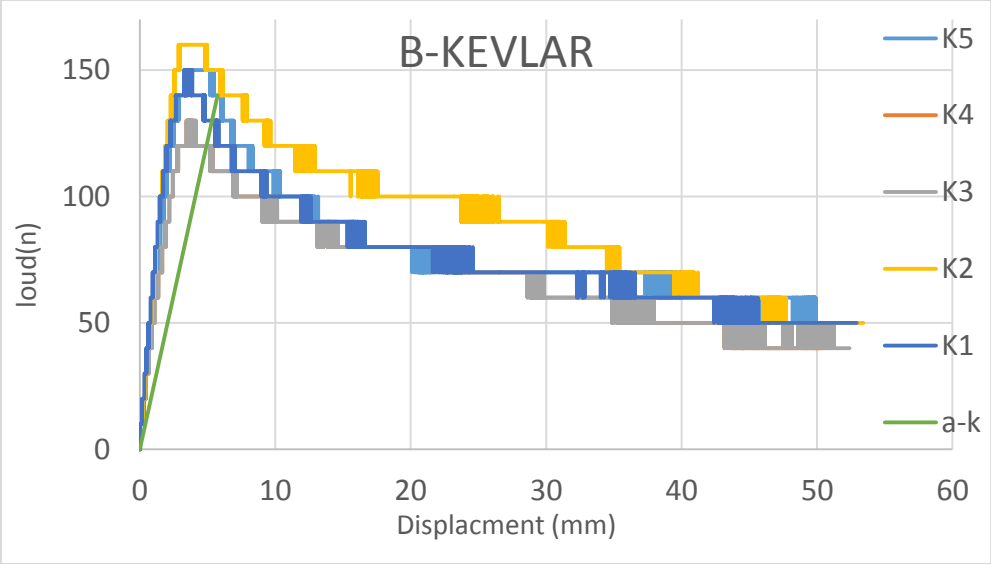
الستريوبور المدعم بصفائح الزجاج، والشكل رقم (٢١,٦) يبين المنحنيات التجريبية الخمسة مع المنحني الناتج عن النمذجة لعينة الستريوبور المدعم بصفائح الكيفلر، والشكل رقم (٢٢,٦) يبين المنحنيات التجريبية الخمسة مع المنحني الناتج عن النمذجة لعينة الستريوبور المدعم بصفائح الهجين، حيث نجد تقارب بين المنحنيات بنسبة مقبولة مما يدل على تقارب في الخواص الميكانيكية للعينات المختبرة والخواص المستنتجة منها مع النتائج الناتجة عن عملية النمذجة.



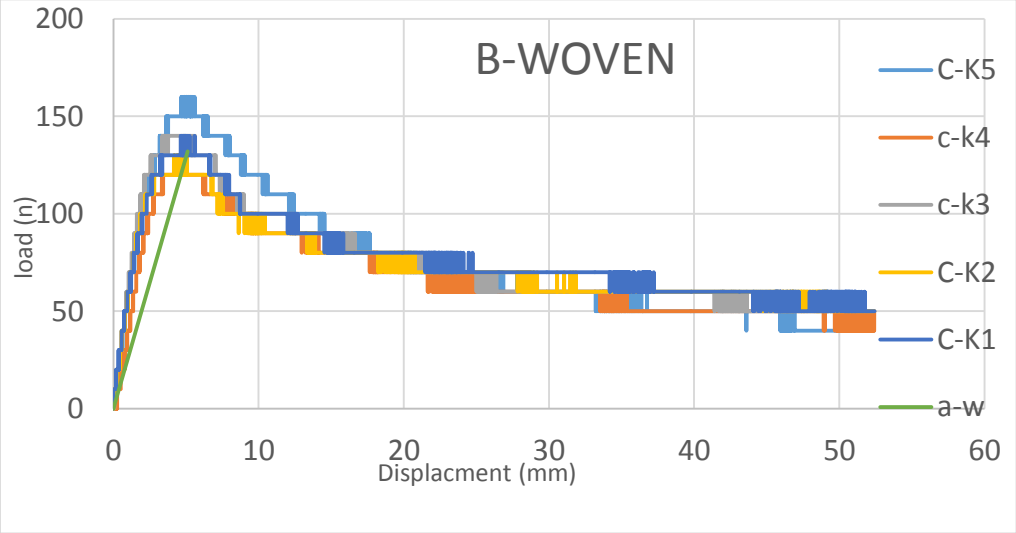
الشكل رقم (١٩,٦): منحي الاستطالة–الحمولة للعينات المختبرة والناتج عن بيانات المحاكاة لعينة الكربون



الشكل رقم (٢٠,٦): منحي الاستطالة–الحمولة للعينات المختبرة تجريبيا والناتج عن بيانات المحاكاة لعينة الزجاج



الشكل رقم (٢١,٦): منحي الاستطالة–الحمولة للعينات المختبرة تجريبيا والناتج عن بيانات المحاكاة لعينة الكيفلر

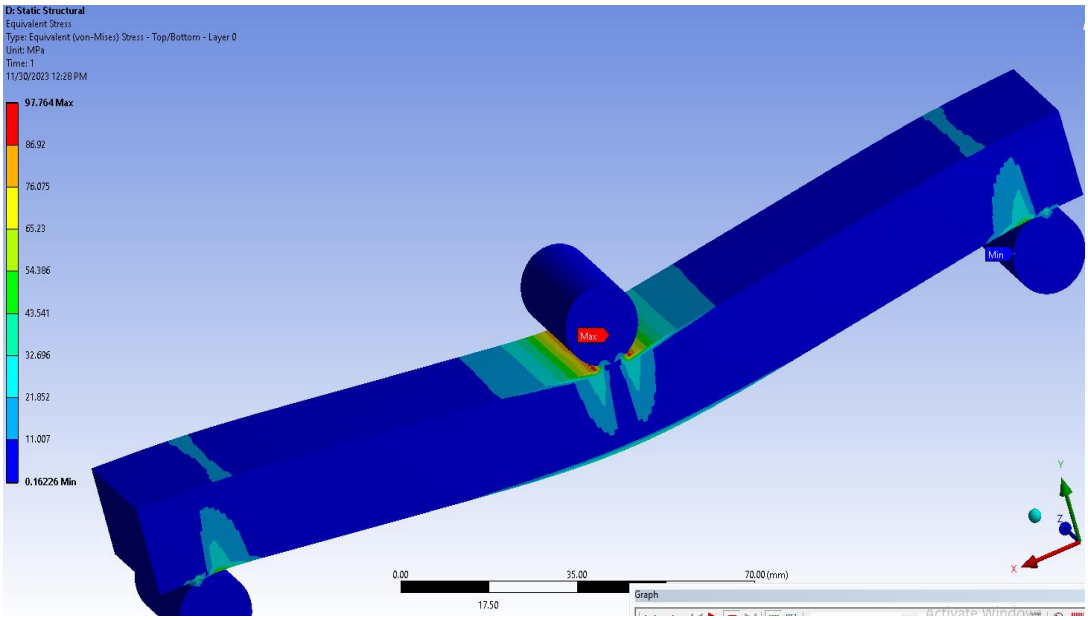


الشكل رقم (٢٢,٦): منحني الاستطالة–الحمولة للعينات المختبرة تجريبيا والناتج عن بيانات المحاكاة لعينة الهجين

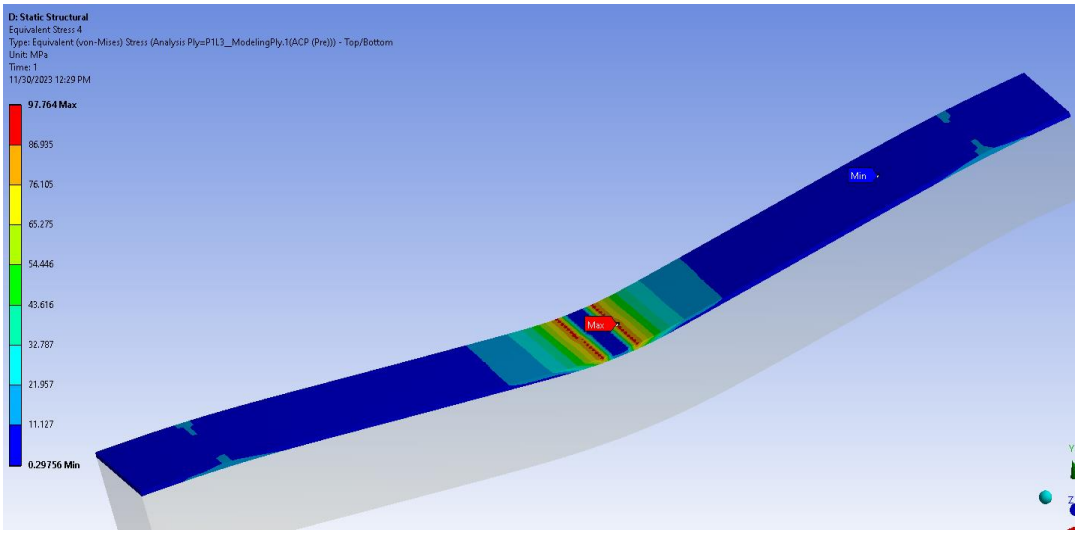
٦–٤–٤ الإجهاد الناتج عن نمذجة اختبار الانحناء للعينات

عند نمذجة عينات الانحناء ذات الأربع أنواع من الألياف، تم تسجيل نتائج الاجهاد الناتج عن الانحناء لكامل جسم العينة ككل، ولكل طبقة داخلة في تكوين الجسم، وبتطبيق حمولة الإنهيار الناتجة تجريبيا لكل نوع من العينات، ونأخذ دراسة عينة الستريوبور المدعمة بصفائح الكربون كمثال لهذه الدراسة، حيث يوضح الشكل رقم (٢٣,٦) الإجهاد الناتج عن نمذجة هذه العينة للجسم ككل، ويوضح الشكل رقم (٢٤,٦) إجهاد الطبقة العلوية من جسم العينة الناتج عن

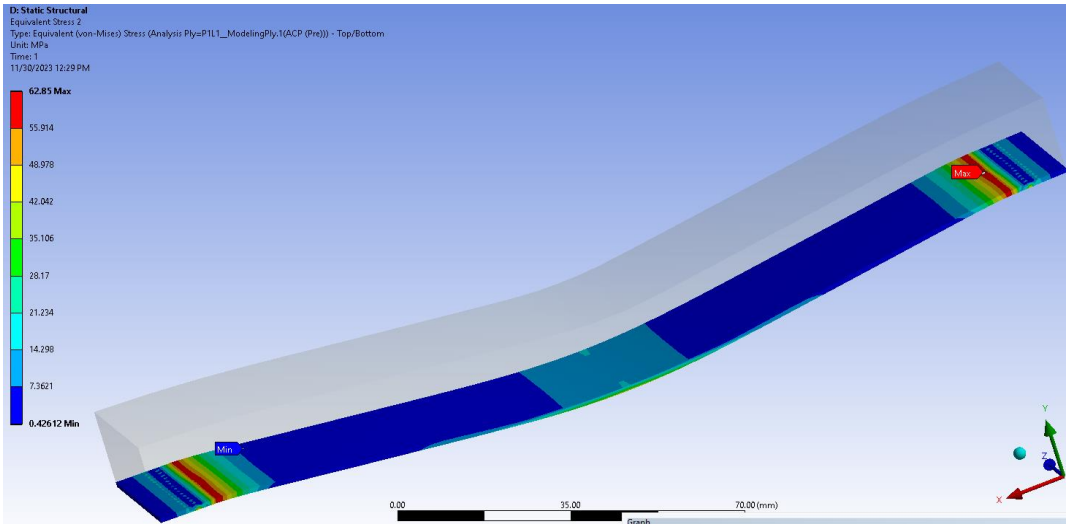
النمذجة، ويوضح الشكل رقم (٢٥,٦) إجهاد الطبقة السفلية من جسم العينة الناتج عن النمذجة، ويوضح الشكل رقم (٢٦,٦) إجهاد الطبقة الوسطى وهي طبقة الستريوبور من جسم العينة الناتج عن النمذجة.



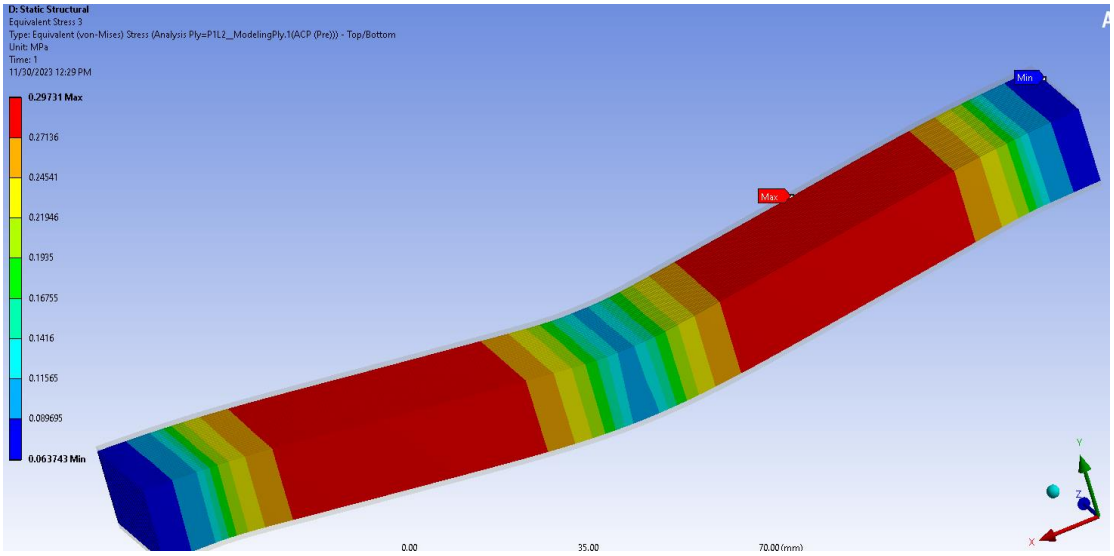
الشكل رقم (٢٣,٦): إجهاد كامل جسم العينة المدعمة بالكربون الناتج عن النمذجة



الشكل رقم (٢٤,٦): إجهاد الطبقة العلوية من جسم العينة المدعمة بالكربون الناتج عن النمذجة



الشكل رقم (٢٥,٦): إجهاد الطبقة السفلية من جسم العينة المدعمة بالكربون الناتج عن النمذجة



الشكل رقم (٢٦,٦): إجهاد الطبقة الوسطى من جسم العينة المدعمة بالكربون الناتج عن النمذجة

تم إجراء نمذجة لجميع اختبارات الانحناء لجميع أنواع العينات المستخدمة في هذا البحث وتسجيل النتائج بنفس الطريقة المعروضة في أشكال الفقرة السابقة لعينة الستريوبور المدعم بصفائح ألياف الكربون، ويبين الجدول رقم (١٢,٦) قيم الإجهادات المستنتجة لأنواع العينات من خلال النمذجه لكافة الطبقات.

الجدول رقم (١٢,٦): قيم الإجهادات الناتجة عن الانحناء لكل طبقة للعينات

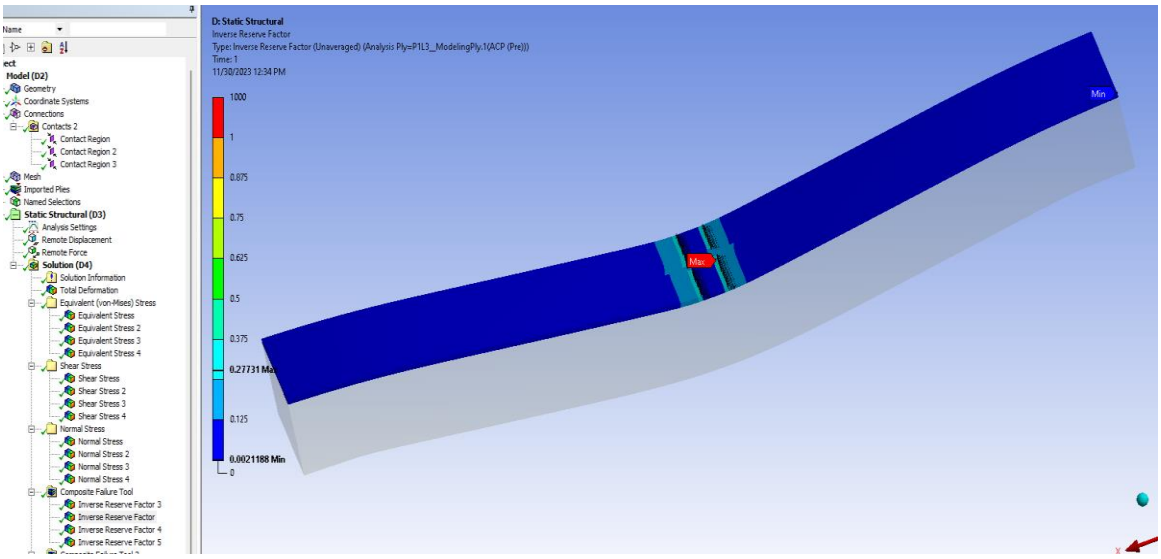
العينة	الكربون عند حمولة الإنهيار 166N	الزجاج عند حمولة الإنهيار 110N	الكيفلر عند حمولة الإنهيار 140N	الهجين عند حمولة الإنهيار 130N
الاجهاد الاعظمي للجسم(Mpa)	97.7	51.7	58.57	68.68
الاجهادالاعظمي للطبقة العلوية(Mpa)	٩٧,٧	٥١,٧	٥٨,٥٧	٦٨,٦٨
الاجهاد الاعظمي للطبقة السفلية(Mpa)	٦٢,٨٥	٣٠,٢٥	٠,٢٥	٤٢,٥١
الاجهاد الاعظمي للطبقة الوسطى(Mpa)	٠,٢٩	٠,١٩	0.25	٠,٢٣

٦-٥ دراسة الإنهيار لطبقات المواد المركبة في اختبار الانحناء على برنامج ANSYS

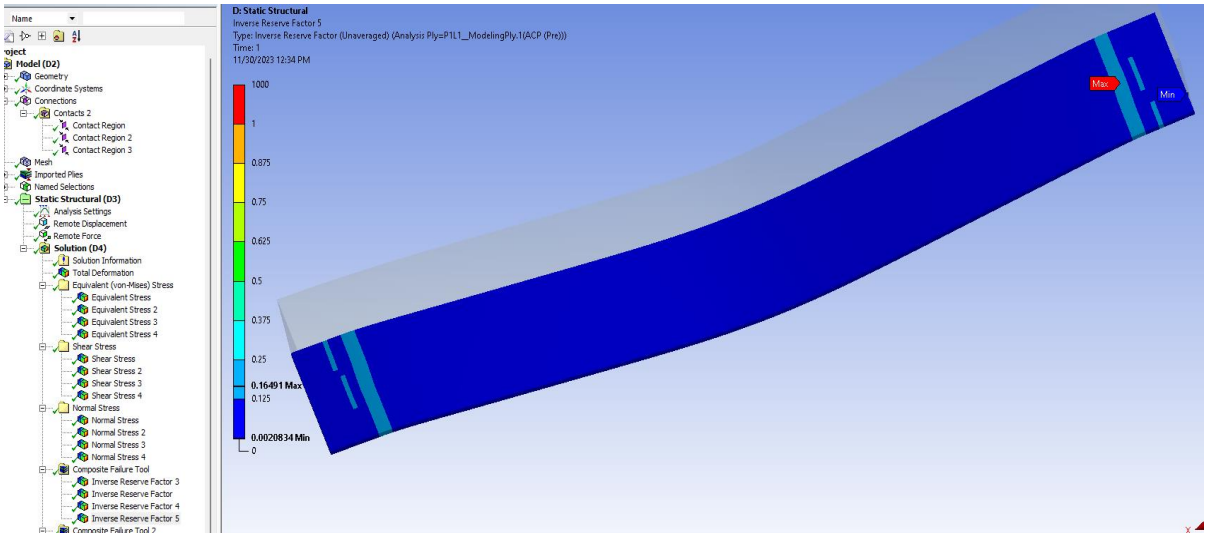
تمت دراسة الإنهيار في هذه الدراسة حسب معياريي Tsi-Wu و الإجهاد الأعظمي على البرنامج العددي المستخدم في هذه الدراسة لطبقات المواد المركبة ذات التدعيم المختلف الألياف الداخلة في تركيب عينات الانحناء، والحصول على قيم معامل الانحناء لهاذإن المعايارإن من معايير إنهيار المواد المركبة ومقارنة قيم معامل الإنهيار لكل معيار والتقارب بين القيم للمعيارين للدلالة على صحة الإنهيار أولا في حال التباعد بين القيم، والجدير بالذكر إنه لم دراسة إنهيار الطبقة الوسطى وهي طبقة الستريوبور لإنها مادة متجإنسة الخواص، ومعايير الإنهيار هذه خاصه بالمواد المركبة غير متجإنسة الخواص.

٦-٥-١ الإنهيار حسب معيار Tsi-Wu

في البداية تمت دراسة الإنهيار حسب معيار Tsi-Wu للطبقة العلوية والسلفية لعينة الكربون التي نأخذه كمثال للدراسة تحت حمولة الإنهيار وهي 166N، فالشكل رقم (٢٧,٦) يوضح قيم معامل الإنهيار e لهذه العينه حسب هذا المعيار للطبقة العلوية، والشكل رقم (٢٨,٦) يوضح قيم معامل الإنهيار للطبقة السفلية لهذه العينة.



الشكل رقم (٢٧,٦): معامل الإنهيار e للعينة المدعمة بصفائح الكربون حسب معيار Tsi–Wu للطبقة العلوية.



الشكل رقم (٢٨,٦): معامل الإنهيار e للعينة المدعمة بصفائح الكربون حسب معيار Tsi–Wu للطبقة السفلية.

وبشكل مشابه لنمذجة العينة السابقة واستنتاج قيم معامل الإنهيار لها، يتم استنتاج قيم معامل الإنهيار حسب هذا المعيار لجميع العينات الأخرى المختلفة العينات، ويبين الجدول رقم (١٣,٦) قيم معامل الإنهيار حسب معيار لجميع العينات عند تطبيق حمولة الإنهيار الخاصة بكل نوع من العينات.

الجدول رقم (١٣,٦): عامل الإنهيار لطبقة المواد المركبة للعينات

العينة	الكربون	الزجاج	الكيفلر	الهجين

عامل الإنهيار الاعظمي حسب معيار Tsi–Wu للإنهيار للطبقة العلوية	**0.27**	٠,٢	٠,٢٧	٠,٢٨
عامل الإنهيار الاعظمي حسب معيار Tsi–Wu للإنهيار للطبقة السفلية	**0.16**	٠,١	٠,١٣	٠,١٦

٦–٥–٢ الإنهيار حسب معيار الإجهاد الاعظمي

وبشكل مشابه لدراسة الإنهيار حسب معيار Tsi–Wu يتم استنتاج عوامل الإنهيار لأنواع العينات الأربعة حسب معيار الإجهاد الأعظمي حيث إن الجدول رقم (١٤,٦) يبين قيم معامل الإنهيار للأربع أنواع من العينات حسب معيار الإجهاد الأعظمي.

الجدول رقم (١٤,٦): قيم معامل الإنهيار للعينات حسب معيار الإجهاد الأعظمي.

عينة الانحناء	الكربون	الزجاج	الكيفلر	الهجين
عامل الإنهيار حسب معيار الاجهاد الاعظمي للإنهيار للطبقة العلوية	٠,٢١	٠,١٩	٠,٢٥	٠,٢٨
عامل الإنهيار حسب معيار الاجهاد الاعظمي للإنهيار للطبقة السفلية	٠,١٦	٠,١	٠,١٢٥	٠,١٦

وبعد مقارنة قيم عوامل الإنهيار للمعيارين السابقين المدروسين في هذا البحث نجد إنها قيم ذات تقارب كبير وفي بعض العينات نجد تساويها وبالتالي يمكن القول إن دراسة الإنهيار مقبولة لهذه العينات في اختبار الانحناء.

٦–٥–٣ دراسة الإنهيار عند تطبيق إزاحة بمقدار (15mm).

من الملاحظ من دراسة الإنهيار في الفقرتين السابقتين رقم (٦–٥–١) و (٦–٥–٢) إنه لايتم إنهيار في طبقات المواد المركبة البولميرية للعينات المدروسة على الانحناء وإنما يحدث الإنهيار في طبقة الستريوبور فقط، وبالتالي متى يحدث إنهيار في طبقات المواد المركبة السفلية أو العلوية؟

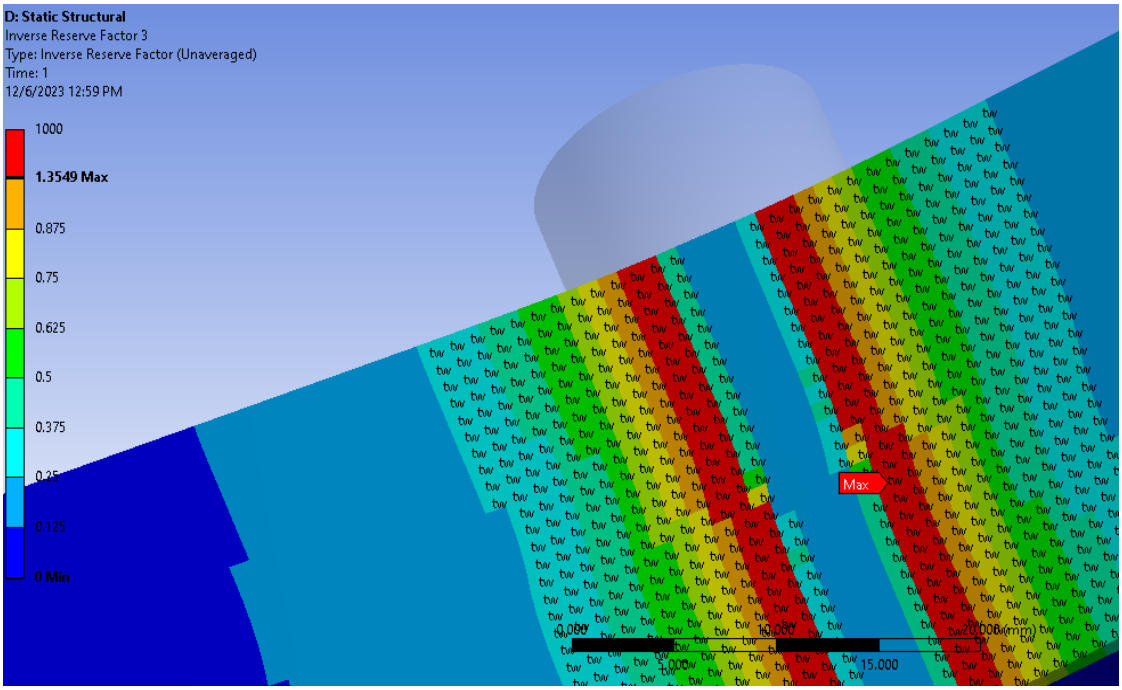
للإجابة قمنا بتطبيق إزاحة بمقدار 15mm على العينات المدروسة وتم تسجيل قيم معاملات الإنهيار حسب المعيارين السابقين والمبينة حسب الجدول رقم (١٥,٦)، حيث نجد إن القيم تزداد عن الدراسة المذكورة في الفقرتين السابقتين (٦-٥-١) و (٦-٥-٢) ولكنها تبقى أصغر من 1 لذلك لايحدث إنهيار ايضا عند هذه الإزاحة.

الجدول رقم (١٥,٦): قيم معامل الإنهيار للعينات للطبقة العلوية عند تطبيق إزاحة 15mm

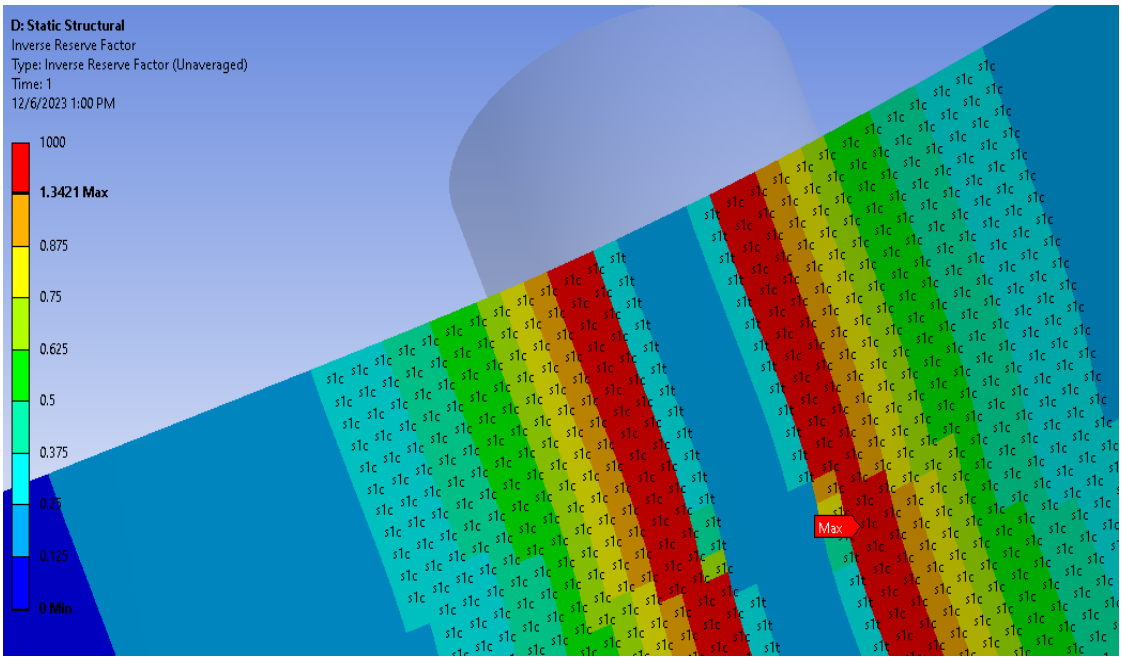
عينة الانحناء	عامل الإنهيار	
	معيار الاجهاد الاعظمي للطبقة العلوية	معيار Tsi- wu للطبقة العلوية
الكربون	0.677	0.681
الكيفلر	0.759	0.87
الزجاج	0.696	0.691
الهجين	0.84	0.851

٦-٥-٤ دراسة الإنهيار عند تطبيق إزاحة بمقدار (30mm).

بنفس الطريقة السابقة نطبق هذه الإزاحة ونسجل قيم معاملات الإنهيار للمعيارين المعتمدين في هذه الدراسة كما هي مبينة في الجدول رقم (١٦,٦)، لنجد إن قيم معاملات الإنهيار تكون أكبر من الـ 1 لذلك يحصل إنهيار في طبقة المواد المركبة البولميرية العلوية حسب المعيارين، ويوضح الشكل رقم (٢٩,٦) معاملات الإنهيار للطبقة العلوية للعينة المدعمة بألياف الكربون حسب معيار Tsi-Wu، ويوضح الشكل رقم (٣٠,٦) معاملات الإنهيار للطبقة العلوية المدعمة بألياف الكربون حسب معيار الإجهاد الأعظمي.



الشكل رقم (٢٩,٦): معاملات الإنهيار للطبقة العلوية للعينة المدعمة بألياف الكربون حسب معيار Tsi–Wu



الشكل رقم (٣٠,٦): معاملات الإنهيار للطبقة العلوية المدعمة بألياف الكربون حسب معيار الإجهاد الأعظمي

الجدول رقم (١٦,٦): قيم معامل الإنهيار للعينات للطبقة العلوية عند تطبيق إزاحة 15mm

عينة الانحناء	عامل الإنهيار	
	معيار الاجهاد الاعظمي للطبقة العلوية	معيار Tsi– wu للطبقة العلوية

الكربون	**1.7**	**1.06**
الكيفلر	**1.51**	**1.74**
الزجاج	**١,٣٩**	**١,٣٨**
الهجين	**1.36**	**1.35**

٦-٦ نتائج الكثافة التجريبية والكثافة النظرية والمسامية لصفائح المواد المركبة

جرى حساب الكثافات التجريبية والنظرية للصفائح الأربعة ذات الأنواع المختلفة للألياف كما تم ذكرها سابقا، تمت الحسابات بالطريقة الحسابية المذكورة بالفقرة (٦-٧) وتسجيل النتائج، والجدول (١٧,٦) يوضح قيم الكثافات والمسامية لعينة الستريوبور المدعم بصفائح المواد المركبة البولميرية ذات ألياف الكربون، والجدول (١٨,٦) يوضح قيم الكثافات والمسامية لعينة الستريوبور المدعم بصفائح المواد المركبة البولميرية ذات ألياف الزجاج، والجدول (١٩,٦) يوضح قيم الكثافات والمسامية لعينة الستريوبور المدعم بصفائح المواد المركبة البولميرية ذات ألياف الكيفلر، والجدول (٢٠,٦) يوضح قيم الكثافات والمسامية لعينة الستريوبور المدعم بصفائح المواد المركبة البولميرية ذات ألياف الهجين.

الجدول رقم (١٧,٦): قيم الكثافة التجريبية والنظرية والمسامية لصفيحة الكربون

العينة	النسبة الوزنية للألياف %	النسبة الوزنية للإيبوكسي%	الكثافة النظرية (g/cm3)	الكثافة التجريبية (g/cm3)	المسامية%
C1	67.5	32.5	1.316	1.377	4.4
C2	68.3	31.7	1.331	1.38	3.6
C3	67.3	32.7	1.278	1.375	7.0
C4	74.5	25.5	1.343	1.413	5.0

C5	70.3	29.7	1.279	1.39	8.0
المتوسط	69.6	30.4	1.345	1.387	5.6
الإنحراف المعياري	3	3	0.029	0.016	1.84

الجدول رقم (١٨,٦): قيم معامل الكثافة التجريبية والنظرية والمسامية لصفيحة الزجاج

العينة	النسبة الوزنية للألياف %	النسبة الوزنية للإيبوكسي%	الكثافة النظرية(g/cm3)	الكثافة التجريبية(g/cm3)	المسامية%
G1	85.6	14.4	1.275	1.31	2.7
G2	88.2	11.8	1.287	1.32	2.1
G3	86.3	13.7	1.263	1.31	3.5
G4	88.9	11.1	1.266	1.31	4.0
G5	91.6	8.4	1.228	1.33	7.6
المتوسط	88.1	11.8	1.264	1.32	4
الإنحراف المعياري	2.36	2.36	0.022	0.009	2.1

الجدول رقم (١٩,٦): قيم معامل الكثافة التجريبية والنظرية والمسامية لصفيحة الكيفلر

العينة	النسبة الوزنية للألياف %	النسبة الوزنية للإيبوكسي%	الكثافة النظرية(g/cm3)	الكثافة التجريبية(g/cm3)	المسامية%

K1	٨٠	٢٠	١,٢٤	١,٣٥٥	٥,٥
K2	٧٩	٢١	١,٢٤٢	١,٣٦٢	٥,٤
K3	٧٩,٥	٢٠,٥	١,٢٣٥	١,٣٩	٤,٢
K4	٧٨,٥	٢١,٥	١,٢٤٦	١,٣٨٨	٧,٨
K5	٨٠	٢٠	١,٢٣٩	١,٣٥٢	٦,٤
المتوسط	٧٩,٤	٢٠,٦	**1.24**	١,٣٦	٥,٨٦
الإنحراف المعياري	**1.6**	**0.58**	**0.01**	**0.02**	**1.19**

الجدول رقم (٢٠,٦): قيم معامل الكثافة التجريبية والنظرية والمسامية لصفيحة الهجين

العينة	النسبة الوزنية للألياف %	النسبة الوزنية للإيبوكسي%	الكثافة النظرية(g/cm3)	الكثافة التجريبية(g/cm3)	المسامية%
W1	٨١,٥	١٨,٥	١,٢٦	١,٣٥	٤,٥
W2	٨٢	١٨	١,٢٦٥	١,٣٧	٣,٥
W3	٨٢,٥	١٧,٥	١,٢٥	١,٣٦	٤
W4	٨٣	١٧	١,٢٤	١,٣٦	٦,٥
W5	٨٣	١٧	١,٢٣٥	١,٣٥٣	٧,٥
المتوسط	٨٢,٤	١٧,٦	١,٢٥	١,٣٥	٥,٢
الإنحراف المعياري	**1.58**	**0.55**	**0.01**	**0.01**	**1.53**

تبين نتائج المسامية السابقة إنها تتراوح بين 10%–2 ، وهي نسبة ذات تأثير ملحوظ على الخصائص الميكانيكية لعينات المواد المركبة. ومن المعروف إن وجود المسامية في هذه المواد، وازدياد نسبتها يؤدي إلى تردي الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة بشكل طردي مع نسبة المسامية، لكن، يصعب الوصول إلى مسامية معدومة بشكل كامل، وتعد عينات المواد المركبة ذات نسبة مسامية أقل من ٥% عينات جيدة التصنيع، وتعد عينات المواد المركبة ذات نسبة مسامية ١٠% مقبولة في بعض التطبيقات ومرفوضة في تطبيقات أخرى بحسب موقع القطعة ووظيفتها .[٢] ولا ينصح استعمال العينات ذات مسامية أعلى من 10% في تطبيقات الطيران لإن سلوكها الميكإنيكي يتناقص بشكل سريع عند تطبيق الحمولات، مما يؤدي إلى إنهيار مفاجئ في القطعة ولا يمكن توقع قيمة إجهاد الإنهيار، لذلك، يجب عند تصنيع قطع جديدة لأول مرة حساب المسامية الناتجة عن طريقة التصنيع هذه، فإن لم تكن ضمن الحدود المطلوبة، يجب البحث عن طريقة تصنيع مختلفة

الفصل السابع: الاستنتاجات والتوصيات

١-٧ الاستنتاجات

من خلال الدراسة التجريبية والمحاكاة العددية لمجموعة العينات السابقة تبين مايلي:

١-١-٧ اختبار الشد

أبدت جميع العينات سلوك شبه خطي حتى الانهيار متشابه عند تعريضها للحمولة حيث يبين الجدول رقم (١,٧) قيم الحمولة الوسطية ومقاومة الشد الأعظمية الوسطية و مقاومة الشد الأعظمية في برنامج التحليل العددي وتقارب النتائج أو تباعدها يعود إلى عدة أسباب نذكر منها

- المعاملات المدخلة في برنامج المحاكاة هي معاملات تقريبية مستنتجة تجريبيا أومأخوذة من الدراسات السابقة.
- عدم وجود وتوفر أدوات قياس دقيقة لقياس الجهادات والانفعالات في المخابر
- وجود أخطاء تصنيعية من حيث التتضيد وضبط توجه زوايا الألياف ونسب الخلط وشروط التخلية ووجود المسامية.

الجدول رقم (١,٧): الخواص الميكانيكية التجريبية والعددية

عينات الشد	الحمولة الأعظمية الوسطية تجريبيا (N)	الإجهاد الأعظمي الوسطية تجريبيا(Mpa)	الاجهاد الأعظمي الناتج عن المحاكاة(Mpa)	الاستطالة التجريبية(mm)	الاستطالة الناتجةعن المحاكاة(mm)
الكربون	١٠٤٢٥	415.95	٤٢٤,١٥	3.39	٢,٩
الزجاج	٦٥٢٠	351.12	٢٢٨,٤	3.46	٢,٧٣
الكيفلر	٧٤٢٠	268.63	٣٠٣,٨	5.02	٤,٨
الهجين	٥٤٤٠	304.61	٢٢٠,٥	2.63	٢,٠٢

٢-١-٧ اختبار الانحناء

عند اجراء هذا الاختبار نلاحظ أن جميع العينات تتشابه بسلوكها تحت حمولة الانحناء، ولكن تبين وجود بعض الاختلاف بين القيم التجريبية وقيم البرنامج ويعود هذا إلى جملة الاسباب السابقة المذكورة في اختبار الشد بالاضافة إلى حساسية برناج التحليل لحساب بعض الاجهادات والانفعالات بدقة على عكس بعض الاجهادات الاخرى. من المهم الاشارة إليه أن الانهيار اثناء الاختبارات حصل في طبقة الستريوبور وعند الاستمرار في التحميل انهارت الطبقة العلوية وهي طبقة المواد المركبة.

- **الاستطالة الكلية**

تم استنتاج الاستطالات الناتجة عن الانحناء عند تطبيق الحمولة الاعظمية التي انهارت عندها طبقة الستريوبور والموضحة في الجدول رقم (٢,٧).

الجدول رقم (٢,٧): قيم الاستطالة التجريبية والاستطالة العددية عند الحمولات العظمى

العينة	كربون	زجاج	كيفلر	هجين
الاستطالة العددية عند اعظم حمولة تجريبية (mm)	٦,١٥	٤,٤٢	٥,٩٠	٥,١١
الاستطالة التجريبية عند أعظم حمولة تجريبية (mm)	٦,٤	٣,٩٢	٥,٠٤	٥,٣٢

- **طبقة الستريوبور**

من خلال الدراستين التجريبية والعددية تبين وجود اختلاف بنتائج الاستطالة والاجهاد وهذا يعود إلى وجود طبقة الايبوكسي الذي يأخذ دور اللاصق بين الستريوبور وطبقات الألياف وبالتالي يؤثر بشكل مباشر على تجاوب جزيئات الستريوبور مع الحمولات المطبقة وعدم تجاوبها مع الحمولة كما لو أنها حرة بدون ايبوكسي، ويوضح الجدول رقم (٣,٧) قيم الاستطالة التجريبية والعددية وقيم الإجهاد لعينات الانحناء.

الجدول رقم (٣,٧): قيم الاستطالة التجريبية والعددية وقيم الإجهاد لعينات الانحناء

الستريوبور	الاستطالة الاعظمية تجريبيا(mm)	الاستطالة الاعظمية عدديا (mm)	الاجهاد الاعظمي تحليليا (Mpa)
مدعم بصفائح الكربون والايبوكسي	٦,٤	٦,١٥	٠,٢٩
مدعم بصفائح الزجاج والايبوكسي	٣,٩٢	٤,٤٢	٠,١٩
مدعم بصفائح الكيفلر والايبوكسي	٥,٠٤	٥,٩	٠,٢٥
مدعم بصفائح الهجين والايبوكسي	٥,٣٢	٥,١١	٠,٢٣

- **الاجهاد الناتج عن الانحناء**

١- من خلال الدراسة التجريبية تبين أن جميع العينات ترسم خطوط بيانية متشابهه فهي متشابهه من حيث السلوك.

٢- تختلف انواع العينات في قيم الاجهادات التجريبية والعددية ويعود الاختلاف إلى جملة العوامل المذكورة سابقا.

٣- تم حساب الاجهادات الاعظمية الناتجة عن الانحناء لجميع طبقات المادة المركبة بسبب اختلاف الطبقات بسلوكها وخواصها من حيث التجانس وعدم التجانس ووجود الحدود الفاصلة بين طبقات المواد المركبة من جهه وبين المواد المركبة والستريوبور من جهه اخرى

٤- بلغت عينة الكربون (97Mpa) أعظم قيمة في مقاومة الانحناء تليها عينة الهجين (68.68Mpa) ثم الكيفلر(58.57Mpa) ثم الزجاج (51.7Mpa) حيث بلغت في طبقة الستريوبور بقيمة متوسطة بين العينات الاربعة(0.24Mpa).

٣-١-٧ الانهيار

من خلال هذه الدراسة تم التوصل إلى عدة نقاط حول موضوع الانهيار والتي نلخصها بما يلي:

١- تم الانهيار مخبريا في طبقة الستريوبور في عينات الانحناء في البداية وكان الانهيار على شكل انضغاط للستريوبور في منطقة التحميل وعند الاستمرار في التحميل تبين أن الانهيار التالي كان في صفيحة المواد المركبة العلوية لجميع العينات.

٢- كانت عينة الهجين هي العينة الأعلى بيت العينات بقيم عامل الانهيار عند الوصول الى الحمولة الاعظمية التي انهار عندها الستريوبور تليها عينة الكيفلر ثم الكربون ثم الزجاج ويعود السبب في ذلك إلى اختلاف خواص صفيحة المواد المركبة والالياف الداخلة في تركيبها.

٣- عند الاستمرار في التحميل حتى حصولنا على استطاله بمقدار mm١٥ لايحدث انهيار لصفائح المواد المركبة العلوية والسفلية لجميع العينات ولكن الانهيار يحدث في صفيحة المواد المركبة العلوية عند استطالة تبلغ تقريبا mm٣٠ حيث يصبح معامل الانهيار أكبر من ١.

٤-١-٧ الكثافة والمسامية

تختلف الكثافة والمسامية بين أنواع العينات الأربعة بسبب اختلاف كثافات الالياف الداخلة في تركيب صفائح المواد المركبة المستخدمة ونجد اختلاف قيم المسامية بين الأنواع الأربعة بسبب تدخل اليد العاملة في الخلط بالإضافة إلى عدم وجود أجهزة خلط مخبرية مناسبة، حيث نجد إن المسامية لجميع العينات السابقة تتراوح بين (٢-١٤%) وهي ذات تأثير سلبي ملحوظ على خواص العينات الميكانيكية ولكن في المواد المركبة البولميرية يصعب الحصول على مسامية معدومة بشكل كامل وتعتبر العينات ذات المسامية٥% هي عينات جيدة تصنيعيا وينصح بأن لاتتجاوز قيمتها ١٠% في المواد التي تستخدم في انشاءات الطيران.

٢-٧ التوصيات

١- دراسة المواد المركبة الهجينة التي تتألف من أكثر من نوع من الألياف نظرا لأهميتها التصنيعية وإعطائها مزايا جديدة للمواد المركبة.

٢- اجراء دراسات على أنواع أخرى من الستريوبور بكثافات مختلفة واستنتاج الخواص الجديدة التي من الممكن أن تعطي مقاومة انحناء أكبر من الدراسة الحالية.

٣- إجراء الدراسات السابقة على الحمولات الديناميكية ومحاولة تقدير عمرها الاستثماري.

٤- المحاولة في تطوير وسائل وتجهيزات أدوات قياس دقيقة تعطي نتائج قياس مخبرية دقيقة.

٥- تطوير استثمار المواد المركبة في مجال الصناعات المحلي نظرا لما لها من مزايا عديدة ومهمة.

٦- إعطاء النمذجة العددية اهتمام أكبر وإدخالة في مجال التعليم والصناعة لما له من أهمية في توفير الوقت والكلفة وعدم الهدر وسهولة الانتاج.

٧- دراسة انفعالات واجهادات المناطق البينية في طبقات المواد المركبة وإعطائها اهتمام كبير نظرا لأهميتها في تغيير الخواص الميكانيكية للمواد المركبة.

Abstract

This research dealt with conducting a tensile test on samples prepared from polymeric composite materials, which consist of epoxy resin as a matrix and fibers (carbon- Glass-Kevlar-a hybrid between carbon and Kevlar) as a reinforcement material. A bending test was also conducted on samples consisting of the same laminates of polymeric composite materials used in tensile testing as a top and bottom layer, and between them is Stereopure as a core material.

From the tensile test, the mechanical properties of the composite material laminates were deduced, as the greatest tensile strength was10425 Mpa for the epoxy laminates with carbon fibers and the greatest Displacment from tensile was for the epoxy laminates with fibres Kevlar 5.02mm and we found that all samples exhibited pseudo -linear before failure.

From the bending test, it was concluded that the greatest bending resistance of the four samples was 97Mpa for the fiber-reinforced sample carbon and for the fiber-reinforced sample hybrid the greatest Displacment was 5.32mm.

This research also dealt with conducting numerical simulations using the Ansys program for tensile and bending tests for one sample of each of the four types with different fibres. We found, after comparing the simulation results with the experimental results, that the results were close in acceptable proportions for many samples.

Through simulation, the failure of layers of composite materials for tensile and bending samples was also studied, and the bending coefficients were deduced for more than one of the failure standards for composite materials in the Ansys program. The failure coefficient values were very similar between the different samples.

Key words: polymeric composite materials, carbon fibers, glass fibers, Kevlar fibers, hybrid fibers, Epoxy resin, Stereopure, numerical simulations using the Ansys.

المراجع

المراجع الأجنبية

[1] Mrazova, M. (2013). Advanced composite materials of the future in aerospace industry. INCAS BULLETIN, 5 (3), 139-150.

[2] Barbero E. J. (2018). Introduction to Composite Materials Design. 3rd Ed. London, New York: USA. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press. p: 573.

[3] Mallick, P.K. (2008). Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. 3rd Ed. London, New York: USA. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press. p: 616.

[4] Forms and patterns of weaving synthetic fibers in China,https://sa.made-in-china.com/co_gdecarbon/

[٥] ANSYS, Inc, "ANSYS Mechanical APDL Element Reference", Release 14.0, http://www.ansys.com

[6] Piaras Kelly. (2013). Solid Mechanics – part 1: An Introduction to Solid Mechanics.the University of Auckland, Springer International Publishing,

[7] Deben kumar Rajak.2021. Emanuwal Linul. Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties.

[8] Soykök. (2012). FAILURE ANALYSIS OF BOLTED AND PINNED COMPOSITE JOINTS UNDER TEMPERATURE EFFECTS. Doctoral Thesis. Philosophy in Mechanical Engineering, Mechanics Program. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University. IZMIR. p: 118.

[9] Woven S-Glass Fiber Technical Data Sheet, Swiss-Composite.www.swiss composite.ch

[10] Mehmet Colakoglu.2006. Damping and Vibration Analysis of Polyethylene Fiber Composite Under Varied Temperature,Technical Education, Afyon University,

[11] ANKESH,JAIKANT and SANJEEV GOYAL.2021. PROPERTIES OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) AND ITS ENVIRONMENTAL EFFECTS.Pages 2151-2162.

[12] Using cork for sound insulation. https://mawdoo3.com.

[13] Polystyrene production line http://chinamachinery.asia/1f-eps-production-line.html

[14] E.M. Fernandes, V.M. Correlo, J.F. Mano, R.L. Reis. 2010. Cork based composites as core in flooring applications Characterization and optimization process using experimental design 2nd IBB Scientific Meeting, Braga, Portugal.

[15] Brian J. Kozak, Joshua D. Shipman, Peng Hao Wang, Blake Shipp.(2019) .Construction of Large Scale UAVs Using Homebuilt Composite Techniques. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering.

[16] Debiasi M, Bouremel ,Y. Khoo , H. H ,Luo S. C, and Tan E. Z. (2011). Change of the Upper Surface of an Airfoil by Macro Fiber Composite Actuators 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference AIAA.

[17] Emanuel M. Fernandes ,Vitor M . Correlo . Joao F.Mano and Rui L. Reis.(2013) . (Natural Fibres as Reinforcement Strategy on Cork-Polymer Composites*), Materials Science Forum* Vols. pp 373-378.

[18] Dissotvy anjal, Willham Molla, Loyis Danjeer. (2018).Surface adhesion between the Styropor and the layer of polymeric composite materials and properties that change with age.Madrid Universty.

[19] CRISTIAN VILAU, MIRCEA CRISTIAN DUDESCU. (2019). Investigation of Mechanical Behaviour of Expanded Polystyrene Under Compressive and Bending Loadingsc. MATERIALE PLASTICE .

[20] Anand kishor verma, Neeraj Kumar Pradhan, Rajesh Nehra, Prateek. (2018). Challenge and Advantage of Materials in Design and Fabrication of Composite UAV Materials Science and Engineering.

[21] Beckry Abdel-Magid, Saeed Ziaee, Katrina Gass, Marcus Schneider, The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E-glass/epoxy composites,Composite Structures, http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.022

[22] Branislav Duleba, Ľudmila Dulebová, Emil Spišák. (2014). Simulation and evaluation of carbon/epoxy composite systems using FEM and tensile test.Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, 74 Masiarska St., 040 01 Kosice, Slovakia.

[23] N. Ozsoy, M. Ozsoy, A. Mimaroglu. (2016). Mechanical Properties of Chopped Carbon Fiber Reinforced EpoxyComposites.Sakarya University, Mechanical Engineering Department, Sakarya, Turkey.

[24] Okutan, B., Aslan, Z. L. & Karakuzu, R. (2001). A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate. Composites Science and Technology.

[25] Okutan, B. & Karakuzu, R. (2001). The failure strength for pin-loaded multi-directional fiber-glass reinforced epoxy laminate. Journal of COMPOSITE MATERIALS.

[26] Fedulov, B., Fedorenko, A., Safonov, A., & Lomakin, E. (2016). Nonlinear shear behavior and failure of composite materials under plane stress conditions. Acta Mech.

[27] Bere P, Krolczyk B. (2017). Determination of mechanical properties of carbon/epoxy plates by tensile stress test. E3S Web of Conferences, 19.1-4.

[28] Finite Element Analysis in ansys. https://www.mechead.com/mesh-methods-and-element-types-in-ansys-workbench/

[29] Peter Szuchy, Tamas Molnár, István Bíró, Sándor Csikós, László Gogolák, József Sárosi. (2021).Bending Fatigue Tests of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composite Plates. Acta Polytechnica Hungarica

[30] Arturo Gomez , Enrique Barbero , Sonia Sanchez-Saez.(2021). Modelling of carbon/epoxy sandwich panels with agglomerated cork core subjected to impact loads. University Carlos III of Madrid.

[31] Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju .(٢٠١٤) .Tensile behavior of hybrid epoxy composite laminate containing carbon and basalt fibers. South Korea.

[32] Anand kishor verma1, Neeraj Kumar Pradhan2, Rajesh Nehra3, Prateek.(2018). Challenge and Advantage of Materials in Design and Fabrication of Composite UAV. CMR University, Bangalore.

[33] György Kovács, Institute of Logistics. (2016). Optimal design of a composite sandwich structure. Sci Eng Compos Mater; 23(2): 237–243.

[34] Henrik HERRANEN , Ott PABUT, Meelis POHLAK, Georg ALLIKAS.(2012). Design and Testing of Sandwich Structures with Different Core Materials. Tallinn University of Technology.

[35] Prof. Doutor Pedro Vieira Gamboa.(2014).Sandwich Structures with Cork Agglomerate Cores for Thermal Insulation Purposes in Aircraft. UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR Engenharia.

[36] Hussein Dalfi , Anwer J Al-Obaidi and Hussein Razaq.(2021). The influence of the inter-ply hybridisation on the mechanical performance of composite laminates:

Experimental and numerical analysis. Department of Mechanical Engineering, University of Wasit Iraq.

[37] Nor Hafizah Ramli Sulong , Siti Aisyah Syaerah Mustapa, Muhammad Khairi Abdul Rashid .(2018) .Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and Constructions. University Malaysia.

[38] Shuhaimi Mansor, Ainullotfi Abdul-Latif. (2013).Validation of UAV Wing Structural Model for Finite Element Analysis. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.

[39] Farrukh Mazhar, Abdul Munem Khan.(2010). STRUCTURAL DESIGN OF A UAV WING USING FINITE ELEMENT METHOD. National University of Science and Technology, Islamabad, Pakistan.

[40] Wisam Abdulkadhim Hussein. (2021) .Production of Lightweight Concrete by Using Polystyrene (cork) waste. College of Materials Eng., University of Babylon, Babylon, Iraq.

[41] Wensu Chen a, Hong Hao, Dylan Hughes b, Yanchao Shi c, Jian Cui c, Zhong-Xian Li.(2018). Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Kent Street, Bentley, WA 6102, Australia.

[42] Péter Szuchy, Tamás Molnár, István Bíró, Sándor Csikós, László Gogolák, József Sárosi. (2021). Bending Fatigue Tests of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composite Plates. Department of Technology, Faculty of Engineering, University of Szeged, Mars tér 7, 6724 Szeged, Hungary.

[43] Henrik HERRANEN, Ott PABUT, Martin EERME, Jüri MAJAK, Meelis POHLAKJaan KERS, Mart SAARNA Georg ALLIKAS, Aare ARUNIIT. (2012). Design and Testing of Sandwich Structures with Different Core Materials. Department of Machinery, Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn, Estonia.

[44] Birhan, Amsalu.(2014). Effect of Confinement and Temperature on the Behavior of EPS Geofoam. Amsalu Birhan Syracuse University.

[45] Rathnakar G., Shivanand H.K.. (2012). Effect of Thickness on Flexural Properties of Epoxy based Glass Fiber Reinforced Laminate, "International Journal of Science and Technology", Vol.2, No.6, PP.(409-412).

المراجع العربية

[46] د أوهام محمد حبيب.(٢٠١٧). مقارنة قيم متانة الانحناء لمادة بوليمرية واخرى متراكبة ليفية بطريقتي الانحناء ثلاثي ورباعي النقطة. قسم العلوم التطبيقية/الجامعة التكنولوجية. العراق.

[47] م علي سلامة. (٢٠٢١). دراسة عددية وتجريبية للوصلات الهجينة في هياكل الطائرات. المعهد العالي للدراسات والعلوم النكنولوجية. دمشق.

[48] م محمد أديب بدر. (٢٠٢٢). تحضير مواد مركبة بوليمير– ألياف زجاج ودراسة خصائصها الميكانيكية. المعهد العالي للدراسات والعلوم النكنولوجية. دمشق.

Syrian Arab Republic

Damascus University - Faculty of Mechanical & Electrical Engineering

Department of Mechanical Design Engineering

Developing the performance of a small aircraft wing made of EPS reinforced with polymer composite material

Thesis Submitted For The Master's Degree In (Materials Science And Engineering)

Prepared By

Eng. Husam Ali

Supervision by

Dr.Eng. Wassim Dib

2024