The Open European Journal of Engineering and Scientific Research (OEJESR)
E-ISSN: 3062-3383
Volume 1, Issue 2, 2025, Pages: 33-44
Journal homepage:
https://easdjournals.com/index.php/oejesr/index

المواد المركبة وتطبيقاتها في الهندسة الميكانيكية: دراسة نظرية تحليلية للتطورات والاتجاهات الحديثة

صالح عبد القادر صالح[1*]، ناصر فضل الله فرج [2]
نعيم علي فضل الله [3]، جمعة الناجي محمد [4]، ابريك الناجي محمد [5]
[1، 2، 3، 4، 5] قسم الهندسة الميكانيكية، كلية التقنيات الهندسية / القبة
[*] البريد الإلكتروني (للباحث المرجعي): aabaeds@gmail.com

Article history	Received	Accepted	Publishing
	01 March 22025	27 April 2025	09 May 2025

الملخص
تُعد المواد المركبة من اهم المواد الحديثة التي تتمتع بخصائص ميكانيكية وفيزيائية متفوقة على المواد التقليدية مثل المعادن والخزف. تنقسم المواد المركبة إلى ثلاثة أنواع رئيسية: البوليمرية المدعمة بالألياف(FRP) ، والمعدنية المركبة(MMC) ، والخزفية المركبة(CMC) ، كل منها يتميز بخصائص فريدة تجعله مناسبًا لتطبيقات محددة. تتميز هذه المواد بالكثافة المنخفضة، المقاومة العالية للتآكل، والمرونة في التصميم، مما يجعلها مثالية لتطبيقات متنوعة مثل صناعة الطيران، السيارات، الهندسة المدنية، والتطبيقات الطبية.
تتضمن طرق تصنيع المواد المركبة القولبة اليدوية، الحقن الراتنجي، والطباعة ثلاثية الأبعاد، حيث تختلف التقنيات بناءً على نوع المادة والتطبيق المطلوب. تتفوق المواد المركبة على المواد التقليدية مثل الفولاذ والألمنيوم من حيث القوة والمرونة، على الرغم من أن تكلفتها أعلى. توفر هذه المواد توازنًا جيدًا بين الوزن والقوة، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي تتطلب أداءً ميكانيكيًا عاليًا.
من التحديات الرئيسية التكلفة العالية للتصنيع والاستدامة البيئية. ومع ذلك، يتوقع استخدام المواد المركبة في مجالات جديدة مثل الطاقة المتجددة والتكنولوجيا البيئية. المواد المركبة الذكية والاستدامة هي مجالات مهمة للبحث المستقبلي. في الختام، تعد المواد المركبة مادة المستقبل في الهندسة الميكانيكية، حيث توفر حلولًا مبتكرة لتحسين الأداء التقني للمنتجات.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة- الخواص الميكانيكية- التطبيقات الصناعية- المواد النانوية المركبة- اللدائن المدعومة بالألياف الزجاجية.

Composite Materials and Their Applications in Mechanical Engineering, An Analytical Study of Developments and Modern Trends

Salih Abdulqadir Salih [1*], Narer F Faraj Abdulaziz [2] , Naeim Ali Fadhlullah [3]
Guma Alnaji Mohamed [4] , Abriak Alnaji Mohamed [5]
[1,2,3,4,5] Department of Mechanical Engineering, College of Engineering Technologies, Al Qubbah, Libya

Abstract
Composite materials are among the most advanced materials that offer superior mechanical and physical properties compared to conventional materials such as metals and ceramics. Composite materials are classified into three main types: fibre-reinforced polymer (FRP), metal matrix composites (MMC), and ceramic matrix composites (CMC), each with unique properties suitable for specific applications. These materials are characterized by low density, high corrosion resistance, and design flexibility, making them ideal for various applications such as aerospace, automotive, civil engineering, and medical applications.
Manufacturing techniques for composite materials include hand lay-up, resin transfer moulding, and 3D printing, with methods varying based on the material type and intended application. Composite materials outperform conventional materials like steel and aluminium in terms of strength and flexibility, although they are more expensive. They provide a good balance between weight and strength, making them suitable for applications requiring high mechanical performance.
Key challenges include high manufacturing costs, complex production processes, and environmental sustainability. However, future applications are expected to expand into new fields such as renewable energy and eco-friendly technologies. Smart composites and sustainability are critical areas for future research. In conclusion, composite materials represent the future of mechanical engineering, offering innovative solutions to enhance technical performance.

Keywords: Composite Materials- Mechanical Properties- Industrial Applications- Nanocomposites- Glass Fibre Reinforced Plastics.

1- المقدمة:

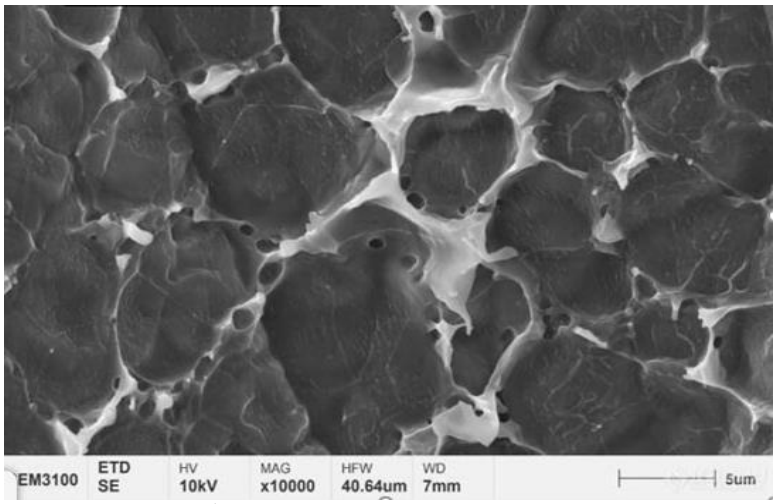
تُعد المواد المركبة (Composite Materials) من أهم الابتكارات العلمية والهندسية في العصر الحديث، لما توفره من خصائص ميكانيكية وحرارية وكيميائية تتفوق على المواد التقليدية المستخدمة في العديد من التطبيقات. وقد ازداد الاهتمام بهذه المواد خلال العقود الأخيرة، لا سيما في مجال الهندسة الميكانيكية، حيث تتيح هذه

المواد إمكانيات تصميمية مرنة وفعالية عالية في الأداء، مع خفة في الوزن، ومقاومة كبيرة للإجهادات والظروف البيئية القاسية.
وفي ظل التحديات الصناعية والبيئية المتزايدة، أصبحت المواد المركبة محورًا أساسيًا في تطوير المعدات والهياكل والأنظمة الميكانيكية، ومكونات وسائل النقل، والطاقة المتجددة، والفضاء، والدفاع.
تُعرف المواد المركبة بأنها مزيج من مادتين أو أكثر تختلفان في الطبيعة والتركيب، يتم دمجهما للحصول على مادة جديدة تتمتع بخصائص محسّنة تتجاوز خصائص المواد الأصلية منفردة. غالبًا ما تتكون هذه المواد من "مادة أساس (Matrix) "مثل البوليمر أو المعدن، و"مادة تعزيز (Reinforcement) "مثل الألياف الزجاجية أو الكربونية، حيث تعمل الأخيرة على تقوية المادة الأساس وتزويدها بخصائص ميكانيكية متميزة [1]
وقد أدت التطورات الحديثة في تكنولوجيا تصنيع المواد المركبة إلى ظهور أنواع جديدة منها مثل المواد النانوية المركبة(Nanocomposites) ، والمواد الذكية (Smart Composites)، التي تستجيب للحرارة أو الضغط أو الإشارات الكهربية، مما وسّع من آفاق استخدامها في التطبيقات المتقدمة. هذه الابتكارات أثرت بشكل كبير على مجالات مثل الطيران، الهندسة المدنية، وصناعة السيارات، ولكن الاستخدام الأكبر والأكثر تأثيرًا كان في الهندسة الميكانيكية، حيث تتمثل الفائدة الأساسية في تخفيض الوزن دون التأثير على القوة، مما يُحسّن من الكفاءة التشغيلية ويوفر الطاقة [2]
في مجال التصميم الميكانيكي، توفر المواد المركبة حلولًا فعالة لتصنيع الهياكل خفيفة الوزن وعالية القوة، كما تُستخدم على نطاق واسع في تصميم الشفرات الهوائية للطائرات والتوربينات الهوائية، فضلاً عن أجزاء المحركات، وأسطح الاحتكاك، والمكونات الهيكلية في الروبوتات، وأنظمة التحكم الميكانيكية. ويتميز استخدامها في هذا السياق بإمكانية التخصيص وفقًا للحاجة، من خلال توجيه الألياف بطرق معينة لإنتاج خصائص محددة مثل المقاومة القصوى للانحناء أو الشد [3]
وفي السياق العربي، بدأت بعض الدول بتبني مشاريع بحثية وصناعية تعتمد على المواد المركبة، لا سيما في مجالات الطيران والطاقة والإنشاءات، إلا أن هذا الاهتمام لا يزال محدودًا مقارنة بالانتشار العالمي، بسبب ضعف البنية التحتية البحثية. واجه البحث العلمي في مجال المواد المركبة في الوطن العربي مجموعة من التحديات التي تؤثر على تطوره وفعاليته .على الرغم من وجود بعض المبادرات البحثية، إلا أن هناك العديد من العقبات التي تحول دون تحقيق تقدم ملموس في هذا المجال.وجود فجوة كبيرة بين الأبحاث المنشورة والاحتياجات الصناعية، الأمر الذي يتطلب استراتيجيات بحثية متكاملة لتشجيع نقل التكنولوجيا وتوطين التصنيع.
إن الدراسة التحليلية للتطورات الحديثة في تكنولوجيا المواد المركبة تكشف عن ثلاثة اتجاهات رئيسية: أولها هو دمج المواد النانوية مثل أنابيب الكربون النانوية (CNTs)لتحسين الخواص الفيزيائية والحرارية للمركبات. وثانيها، هو التصنيع باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Printing) لمركبات البوليمرات المدعومة بالألياف، حيث أصبح بالإمكان إنتاج أشكال معقدة بكفاءة عالية. أما الاتجاه الثالث، فيكمن في التكامل مع المواد الذكية لتطوير أنظمة ذاتية الاستشعار والإصلاح الذاتي، وهي من المجالات الرائدة في التطبيقات الميكانيكية المستقبلية [4]
على الرغم من كل هذه المزايا، تواجه المواد المركبة عددًا من التحديات، أبرزها صعوبة إعادة التدوير، وتكلفة الإنتاج المرتفعة مقارنة بالمواد التقليدية، إضافة إلى التعقيد في النمذجة والتحليل نتيجة لعدم تجانس بنيتها الداخلية. ويستدعي هذا التحدي تطوير أدوات تصميم وتحليل أكثر تقدمًا تعتمد على الذكاء الاصطناعي والمحاكاة متعددة المستويات، لتسريع عملية التطوير وتقييم الأداء قبل مرحلة التصنيع.
لذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تقديم تحليل شامل. للتطورات والاتجاهات الحديثة في المواد المركبة مع التركيز على تطبيقاتها في الهندسة الميكانيكية، من خلال مراجعة الأدبيات الحديثة، واستعراض تقنيات التصنيع، وتحليل الخصائص، ومناقشة التحديات، واقتراح رؤى مستقبلية لتعزيز البحث والتطوير في هذا المجال محليًا وعالميًا.
كما تسعى الورقة إلى الإسهام في بناء قاعدة معرفية تساعد الباحثين والمهندسين على فهم آليات الاستفادة المثلى من هذه المواد في تصميم وتطوير الأنظمة الميكانيكية ذات الكفاءة العالية والأداء المتقدم.

2- تصنيف المواد المركبة

تصنَّف المواد المركبة إلى عدة أنواع بناءً على نوع المصفوفة، التي تعد العنصر الأساسي في تحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمادة المركبة. تشمل الأنواع الأساسية:

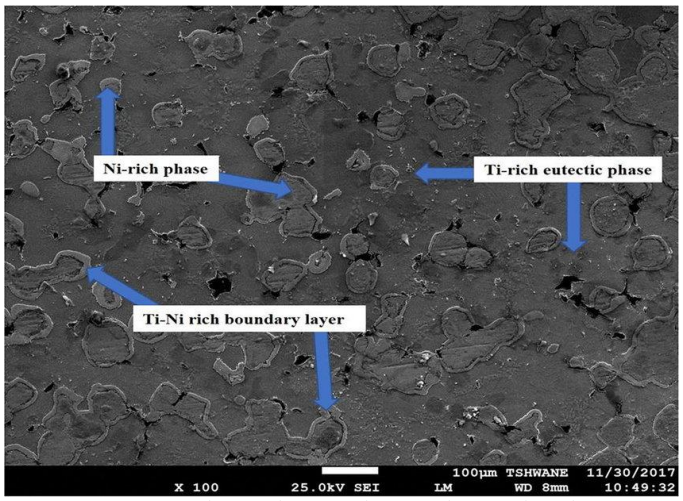
1.2- المواد البوليمرية المدعمة بالألياف Fiber Reinforced Polymer (FRP): هي نوع من المواد المركبة تتكون من مصفوفة بوليمرية (مثل الإيبوكسي أو البوليستر) مدعّمة بـ ألياف عالية القوة، مثل تلك التي تحتوي على ألياف الكربون أو الألياف الزجاجية، تعد من أكثر المواد المركبة شيوعًا. يتميز هذا النوع بوزنه الخفيف وقدرته العالية على تحمل الضغوط الميكانيكية، ما يجعله مناسبًا لتطبيقات الطيران والسيارات.[5]



شكل1: البنية المجهرية لعينة من المواد المركبة المدعمة بالألياف(FRP) .

كما هو موضح في الشكل (1)، تُظهر الصورة المجهرية المأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) بنظام تكبير x10000 بنية سطحية لعينة من (FRP). يمكن ملاحظة البنية بوضوح، حيث تظهر الحبيبات الكثيفة والمترابطة مع وجود فجوات دقيقة تفصل بينها. تشير هذه الفجوات إلى المسامات التي قد تؤثر على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمركب، مثل امتصاص الماء والطهي. كما أن التجانس في التكوين يدل على جودة المعالجة أو التعديل الذي تم على المركب. تم التقاط الصورة بطاقة شعاع إلكتروني 10 كيلو فولت.

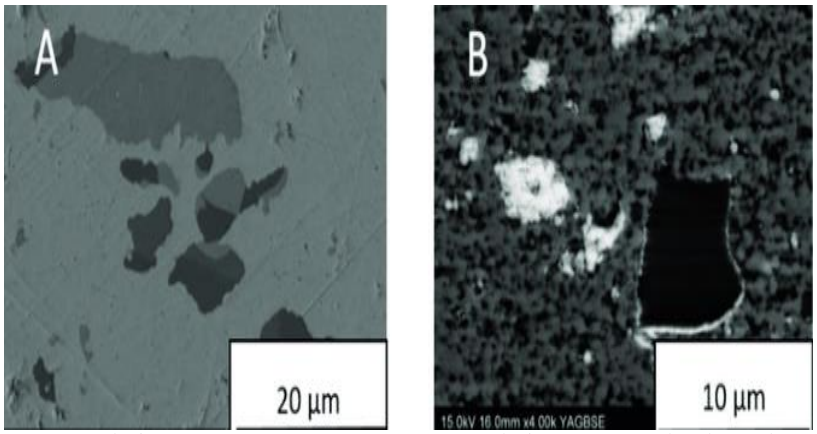
2.2- المواد المعدنية المركبة Metal Matrix Composites (MMC): تتكون هذه المواد من مصفوفة معدنية مدعّمة بألياف أو جسيمات خزفية، وتُستخدم في التطبيقات التي تتطلب قدرة عالية على تحمّل الحرارة والضغط، مثل مكونات المعدات الصناعية عالية الأداء.



شكل 2: البنية المجهرية لعينة من المصفوفة المعدنية المركبة$TiNi-CSP_3$.

كما هو موضح في الشكل (2) تُظهر الصورة المجهرية المأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) بنظام تكبير ×1000 التركيب الدقيق لمادة معدنية مركبة تتكون من عناصر التيتانيوم (Ti) والنيكل .(Ni) يمكن ملاحظة الأطوار المختلفة داخل البنية، حيث تم تحديد مناطق غنية بالنيكل (Ni-rich phase) ومناطق غنية بالتيتانيوم(Ti-rich eutectic phase) ، بالإضافة إلى طبقة حدودية غنية بكل من التيتانيوم والنيكل .(Ti-Ni rich boundary layer) هذه التوزيعات تدل على تجانس نسبي في تركيب المادة، مما يعزز من خواصها الميكانيكية والحرارية. الصورة توضح كيف تؤثر المكونات الدقيقة على الأداء العام للمادة المركبة [7]

3.2 - المواد الخزفية المركبة Ceramic Matrix Composites (CMC): هي مواد تتميز بمصفوفة خزفية معززة بألياف خزفية أخرى. توفر هذه المواد خصائص فريدة من نوعها مثل المقاومة العالية للتآكل والحرارة، ما يجعلها ملائمة لتطبيقات صناعية مثل المحركات الفضائية [8]



شكل 3: صورًا للبنية المجهرية لمركبات السيراميك والمعادن، حيث تمثل الصورة (A) مركب ZrO_2-Ti-Ni بينما تمثل الصورة (B) مركب Al_2O_3-TiC-Ti .

كما هو موضح في الشكل (3) تظهر الصورة المجهرية (A) و (B) المأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) توضح التركيب الدقيق لمادتين أو حالتين مختلفتين لمادة مركبة. في الصورة(A) ، التي تم التقاطها عند تكبير أقل (مقياس 20 ميكرومتر)، يمكن ملاحظة بنية داخلية تحتوي على أطوار مختلفة، حيث تظهر مناطق داكنة ذات شكل غير منتظم موزعة داخل مصفوفة أكثر إشراقًا. من المحتمل أن تمثل هذه المناطق شوائب أو أطوار ثانوية مختلفة في التركيب الكيميائي، مما يدل على وجود توزيع غير متجانس نسبيًا داخل المادة.
أما الصورة(B) ، والتي تم التقاطها عند تكبير أعلى (مقياس 10 ميكرومتر)، فتُظهر بنية أكثر تعقيدًا تحتوي على جسيمات بيضاء دقيقة منتشرة ضمن مصفوفة داكنة، بالإضافة إلى مسام واضحة تدل على وجود فراغات أو عيوب داخلية. تشير التباينات في التكوين إلى وجود أطوار متعددة، مثل طور غني بالنيكل (Ni-rich phase) وطور يوتكتيكي غني بالتيتانيوم(Ti-rich eutectic phase) ، مع احتمالية وجود طبقات حدودية تحتوي على مزيج من كلا العنصرين (Ti-Ni rich boundary layer). يعكس هذا التنوع في التركيب المجهري تأثير العمليات التصنيعية أو المعالجات الحرارية على البنية النهائية للمادة، مما يساهم في تحديد خواصها الميكانيكية والفيزيائية، مثل الصلابة، المقاومة الحرارية، وقابلية التحمل تحت الأحمال المختلفة [9].

3- خصائص المواد المركبة

تتميز المواد المركبة بمجموعة من الخصائص التي تجعلها خيارًا مثاليًا في العديد من التطبيقات الهندسية. من أبرز هذه الخصائص:

1.3. الكثافة المنخفضة:

تُعد خفة الوزن إحدى أبرز الخصائص التي تتميز بها المواد المركبة مقارنة بالمواد التقليدية مثل الفولاذ والألمنيوم، حيث تسهم بشكل كبير في تقليل الأحمال والإجهادات الواقعة على الأنظمة والهياكل الهندسية، مما يحسن من كفاءتها وأدائها التشغيلي.

2.3. المقاومة العالية للتآكل:

تتميز المواد المركبة بقدرتها الفائقة على مقاومة الظروف البيئية القاسية، بما في ذلك الرطوبة، ودرجات الحرارة العالية، والتفاعلات الكيميائية، مما يجعلها خيارًا مثاليًا للتطبيقات التي تتطلب تحملًا عاليًا في بيئات صعبة.

3.3. المرونة والتخصيص:
تُعد المواد المركبة مرنة في خصائصها، حيث يمكن تعديلها بطرق متعددة وفقًا لمتطلبات الاستخدام، مثل تغيير نوع الألياف المستخدمة أو نسبة المصفوفة، مما يمنح المصممين حرية واسعة في التطوير والابتكار.

4.3. القدرة على تعزيز الخصائص:
يمكن تعزيز خواص المواد المركبة مثل القوة، والمرونة، والصلابة من خلال تعديل نوع الألياف المستخدمة أو توظيف تقنيات تصنيع متطورة كأنظمة الحقن أو الطباعة ثلاثية الأبعاد.

4- التطبيقات الهندسية للمواد المركبة

1.4 صناعة الطيران والفضاء(Aerospace Industry)

الفوائد الرئيسية:
- خفض الوزن :تستبدل المواد المركبة ما يصل إلى 50% من المعادن في الطائرات الحديثة.
- الحفاظ على القوة :ألياف الكربون توفر قوة شد تفوق الفولاذ بخمسة أضعاف مع ربع وزنه.
- تحسين كفاءة الطاقة :يُسهم تقليل وزن الطائرة في خفض استهلاك الوقود بشكل ملحوظ على مدار السنة، مما ينعكس إيجاباً على الكفاءة التشغيلية والتكاليف الاقتصادية.

أمثلة تطبيقية:
- بوينج 787 دريملاينر 50% :من هيكلها من المواد المركبة (توفير 20% وقود).
- طائرات F-35 العسكرية :هياكل خارجية من الكربون-إيبوكسي مقاومة للرادار.
- الصواريخ الفضائية :خزانات وقود مركبة تخفف الوزن بنسبة 30.%

التحديات:
- التكلفة العالية لفحص العيوب (الأشعة السينية/الموجات فوق الصوتية).
- صعوبة الإصلاح مقارنة بالمعادن.

2.4 صناعة السيارات(Automotive Industry)

الفوائد الرئيسية:
- تحسين كفاءة الوقود :تخفيض 10% في الوزن = تحسين 6-8% في استهلاك الوقود.
- تصميم مرن :إمكانية تشكيل أجزاء معقدة بقطع أقل.
- مقاومة التآكل :لا تصدأ مثل الفولاذ.

أمثلة تطبيقية:
- سيارات :BMW i3 هيكل كربوني بالكامل (وزن 1300 كجم فقط).
- سيارات :F1 جسم المركبة من ألياف الكربون تتحمل صدمات
- الشاحنات الكهربائية :استخدام المركبات لتعزيز مدى البطارية.

التحديات:
- تكلفة الإنتاج العالية (5-10 أضعاف الفولاذ).
- محدودية مراكز إعادة التدوير.

3.4 الطباعة ثلاثية الأبعاد(3D Printing)

الفوائد الرئيسية:
- التصنيع الإضافي :يسهم هذا الأسلوب في خفض كبير في كمية الفاقد مقارنة بالطرق التقليدية، مما يعزز الكفاءة ويقلل استهلاك المواد.
- درجة عالية من التخصيص :تسمح بإنتاج مكونات معقدة تتمتع بخصائص ميكانيكية مصممة خصيصًا حسب الحاجة

. **أمثلة تطبيقية:**
- قطع غيار الطائرات :شفرات التوربينات المطبوعة من نايلون مدعم بألياف الكربون.
- الأطراف الصناعية :تتميز بخفة الوزن وإمكانية تصميمها بشكل مخصص لتلبية الاحتياجات الفردية لكل مريض، مما يعزز الراحة والكفاءة الوظيفية.
- المعدات الطبية :تُصنَّع الأدوات الجراحية من مواد مركبة تمتاز بمقاومتها العالية لعمليات التعقيم المتكررة، مع الحفاظ على المتانة والدقة المطلوبة في الإجراءات الطبية.

التحديات:
- محدودية الأداء الميكانيكي :تتميز المواد المصنعة بالطباعة ثلاثية الأبعاد بانخفاض نسبي في القوة والمتانة مقارنة بالمواد المنتجة باستخدام الأساليب التقليدية، مما قد يقيّد استخدامها في التطبيقات التي تتطلب تحملاً ميكانيكياً عالياً.
- انخفاض سرعة الإنتاج :تعاني الطباعة ثلاثية الأبعاد من بطء نسبي عند تصنيع الأجزاء الكبيرة، مما قد يؤثر على كفاءة العمليات في التطبيقات واسعة النطاق.

4.4. صناعة الطاقة(Energy Sector)

الفوائد الرئيسية:
- شفرات توربينات الرياح :تتميز الشفرات المصنوعة من المواد المركبة بأنها أطول بكثير مقارنة بالشفرات المعدنية التقليدية، مع الحفاظ على وزن أقل بمعدل يقارب النصف، مما يعزز من كفاءة الأداء وديناميكية التشغيل.
- مقاومة الإجهاد :تتمتع المواد المركبة بقدرة عالية على تحمل دورات تحميل متكررة تصل إلى مستويات كبيرة على مدار عمرها التشغيلي، مما يضمن أداءً موثوقًا واستدامة طويلة الأمد.

أمثلة تطبيقية:
- توربينات :GE Haliade-X شفرات طولها 107م من GFRP أكبر توربين رياح بحري.

- خزانات الهيدروجين :مركبات الكربون تخزن غاز عند 700 ضغط جوي.
- الألواح الشمسية :هياكل مركبة خفيفة لمحطات الفضاء.

التحديات:

- تكلفة الصيانة :تتطلب الشفرات العملاقة لتوربينات الرياح برامج صيانة متخصصة، مما يؤدي إلى ارتفاع التكاليف التشغيلية بسبب الحاجة إلى عمليات فحص وإصلاح دورية لضمان كفاءتها واستمرارية أدائها.
- التخلص من الشفرات المستهلكة :يُتوقع أن تمثل الشفرات المنتهية صلاحيتها تحدياً بيئياً متزايداً في المستقبل القريب، مع تزايد كميات النفايات الناتجة عن انتهاء العمر التشغيلي لشفرات توربينات الرياح.

5- تقنيات تصنيع المواد المركبة

تعد عملية تصنيع المواد المركبة أمرًا معقدًا ومتعدد الخطوات، ويجب اختيار التقنية المناسبة وفقًا لنوع المادة المركبة ونوع التطبيق المراد استخدامها فيه. من أبرز التقنيات:

1.5 . القولبة اليدوية (Hand Lay-Up): هي الطريقة الأبسط والأكثر استخدامًا لتصنيع الأجزاء الكبيرة من المواد المركبة. يتطلب هذا الأسلوب تطبيق الألياف يدويًا في قالب، ثم يضاف الراتنج [10]

2.5. الحقن الراتنجي (Resin Transfer Molding): تتضمن هذه التقنية حقن الراتنج داخل قالب يحتوي على الألياف المعززة، وتُستخدم للحصول على قطع ذات خصائص ميكانيكية ممتازة [11]

6- التحليل والمقارنة

المُقارنة بين المواد المركبة (Composite Materials) تعتمد على عدة معايير مثل التركيب، الخصائص الميكانيكية، التطبيقات، التكلفة، وسهولة التصنيع.

فيما يلي مقارنة عامة بين أنواع رئيسية من المواد المركبة:

1.6 من حيث التركيب

جدول 1: مقارنة بين المواد المركبة المختلفة من حيث التركيب البنيوي.

نوع المادة المركبة	الألياف (التقوية)	المادة الأساسية (المصفوفة)	أمثلة
مركبات بوليمرية	ألياف زجاجية، كربون، أراميد	راتنجات بوليمرية (إيبوكسي، بوليستر)	أجزاء الطائرات، زوارق، سيارات
مركبات معدنية	ألياف كربون، سيراميك	ألومنيوم، تيتانيوم، مغنيسيوم	هياكل فضائية، قطع غيار سيارات
مركبات سيراميكية	ألياف سيراميكية، سيليكون كاربيد	سيراميك، زجاج	توربينات، أجزاء مقاومة للحرارة
مركبات خشبية (مثل الخشب الرقائقي)	ألياف خشبية	راتنجات طبيعية أو صناعية	اثاث، بناء

كما هو موضح في الجدول (1) أن تصنيف المواد المركبة يعتمد بشكل أساسي على المصفوفة والألياف المستخدمة، والتي تحدد بدورها خصائص المادة وتطبيقاتها . فمثلاً:

- PMCsمثالية للتطبيقات التي تتطلب خفة الوزن وسهولة في التصنيع.
- MMCsو CMCsمناسبة للتطبيقات الهندسية المتقدمة التي تتطلب مقاومة للحرارة والإجهاد.
- المركبات الخشبية أقل تكلفة، وتُستخدم في التطبيقات اليومية والبناء البسيط.

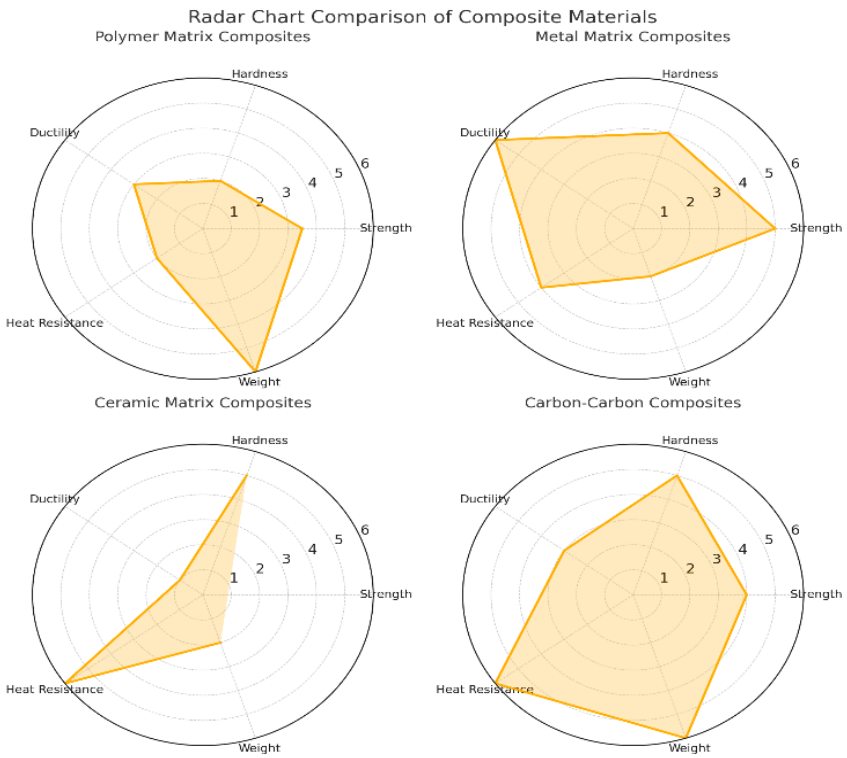
2.6. من حيث الخصائص الميكانيكية

جدول 2: يعرض مقارنة بين المواد المركبة المختلفة من حيث الخصائص الميكانيكية.

المادة المركبة	القوة	الصلابة	المتانة	مقاومة الحرارة	الوزن
مركبات بوليمرية	متوسطة إلى عالية	متوسطة	جيدة	محدودة (حتى ≈200°C)	خفيفة
مركبات معدنية	عالية جدًا	عالية	ممتازة	عالية (حتى ≈600°C)	متوسطة
مركبات سيراميكية	عالية (هشة)	عالية جدًا	ضعيفة	ممتازة (فوق 1000°C)	ثقيلة نسبيًا
مركبات الكربون-الكربون	عالية	عالية جدًا	جيدة	ممتازة (للتطبيقات الفضائية)	خفيفة

من الجدول (2) نلاحظ أن اختيار نوع المادة المركبة يعتمد على متطلبات الأداء الخاصة بالتطبيق:

- إذا كانت خفة الوزن والتكلفة المنخفضة مطلوبة: يتم اختيار PMCs
- إذا كانت هناك حاجة إلى صلابة عالية وتحمل حراري متوسط :يتم استخدام MMCs
- في البيئات القاسية حراريًا مع وجود خطر هشاشة: تُستخدم CMCsبحذر.
- أما في البيئات الفضائية أو التطبيقات الحرارية القصوى مع الحفاظ على الأداء الكامل: فـ CCCsهي الخيار الأفضل، رغم كلفتها العالية.



شكل 4: مقارنة بين الأنواع الرئيسية للمواد المركبة من حيث الخصائص المختلفة.

من الشكل (4) يوضح التحليل إلى أنه لا توجد مادة مثالية لجميع التطبيقات، بل يعتمد الاختيار على طبيعة الاستخدام:

- PMCs مناسبة للتطبيقات خفيفة الوزن ومنخفضة التكلفة.
- MMCs توازن بين القوة والمتانة.
- CMCsتتفوق في مقاومة الحرارة لكنها هشة.
- CCCs تقدم أفضل أداء شامل لكن بكلفة عالية.

3.6. من حيث التطبيقات

المركبات البوليمرية:
تطبيقات: صناعات الطيران (أجنحة، هياكل)، السيارات (هياكل خفيفة)، الزوارق، أنابيب الضغط.
المزايا: خفيفة الوزن، مقاومة للتآكل، سهولة التشكيل.
العيوب: محدودية في تحمل الحرارة العالية.

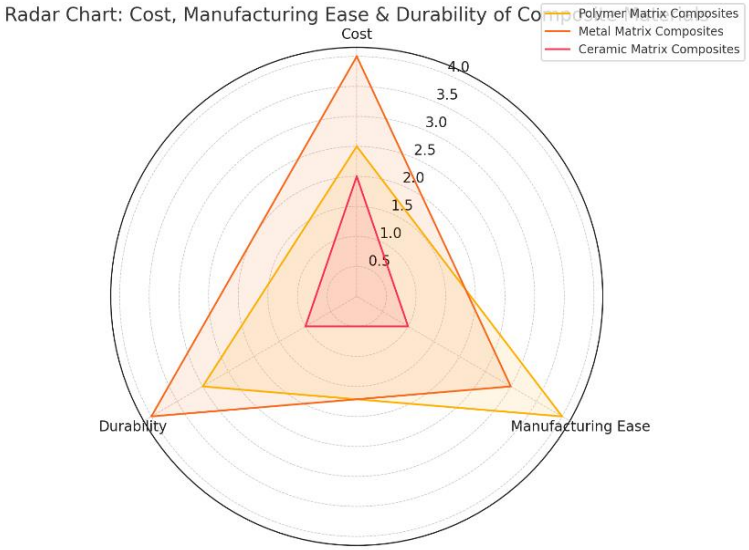
المركبات المعدنية:
تطبيقات: محركات الطائرات، مركبات فضائية، إطارات عالية القوة.
المزايا: تحمل حرارة عالية، قوة ممتازة.
العيوب: تكلفة عالية، وزن أعلى من البوليمرية.

المركبات السيراميكية:
تطبيقات: توربينات الغاز، أجزاء محركات صواريخ، دروع حرارية.
المزايا: مقاومة حرارية وكيميائية فائقة.
العيوب: هشاشة عالية، صعوبة في التصنيع.

4.6. من حيث التكلفة والتصنيع

جدول 3: يعرض مقارنة بين المواد المركبة المختلفة من حيث تكلفة الإنتاج وتقنيات التصنيع.

المادة	التكلفة	سهولة التصنيع	متانة التصنيع
مركبات بوليمرية	متوسطة إلى عالية	سهلة (مثل التشكيل بالقولبة)	جيدة
مركبات معدنية	عالية جدًا	معقدة (تطلبان درجات حرارة عالية)	ممتازة
مركبات سيراميكية	عالية	صعبة (تطلبان تقنيات متخصصة)	محدودة



شكل 5: يوضح مقارنة بين المواد المركبة المختلفة من حيث التكلفة، سهولة التصنيع، والمتانة.

يوضح الشكل (5) أن اختيار المادة المركبة يعتمد على طبيعة التطبيق الصناعي أو الهندسي .فمثلاً:

- PMCsمثالية للتطبيقات التي تتطلب كلفة منخفضة وسهولة تصنيع مثل صناعة السيارات، الطائرات الخفيفة، والهياكل المعمارية.
- MMCsمناسبة للتطبيقات التي تتطلب متانة وأداء ميكانيكي عالي، كما في مكونات المحركات.
- CMCsقد تُستخدم في البيئات ذات درجات الحرارة العالية، ولكن يحد من استخدامها انخفاض المتانة وصعوبة التصنيع.

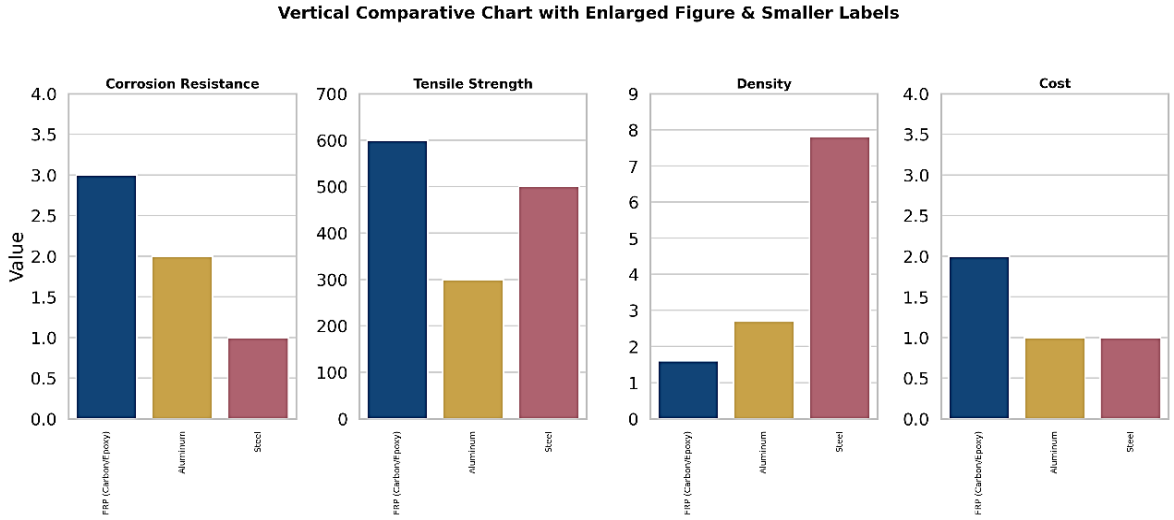
5.6 مقارنة بين المواد المركبة والمواد التقليدية

عملية المقارنة بين المواد المركبة والمواد التقليدية تساعد في فهم الفروق الجوهرية بين الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للمواد. سوف نقوم بمقارنة خصائص المواد المركبة مع الألمنيوم والفولاذ باستخدام الجدول التالي:

جدول 4: يقدم مقارنة بين المواد المركبة والمواد التقليدية.

المادة	مقاومة التأكل	مقاومة الشد (ميغا بأسكال)	الكثافة (g/cm^3)	الكلفة
FRP (كربون/ايبوكسي)	عالية	600	1.6	متوسطة
الومنيوم	متوسطة	300	2.7	منخفضة
فولاذ	منخفضة	500	7.8	منخفضة

من الجدول (4)، نلاحظ أن المواد المركبة توفر توازنًا جيدًا بين الوزن والقوة، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي تتطلب أداءً ميكانيكيًا عاليًا دون زيادة الوزن. على الرغم من أن تكلفتها أعلى من الألمنيوم والفولاذ، فإن فوائدها من حيث القوة والمرونة تُعتبر مبررًا لهذا الفرق في التكلفة، خصوصًا في التطبيقات التي تتطلب خصائص فنية متقدمة.



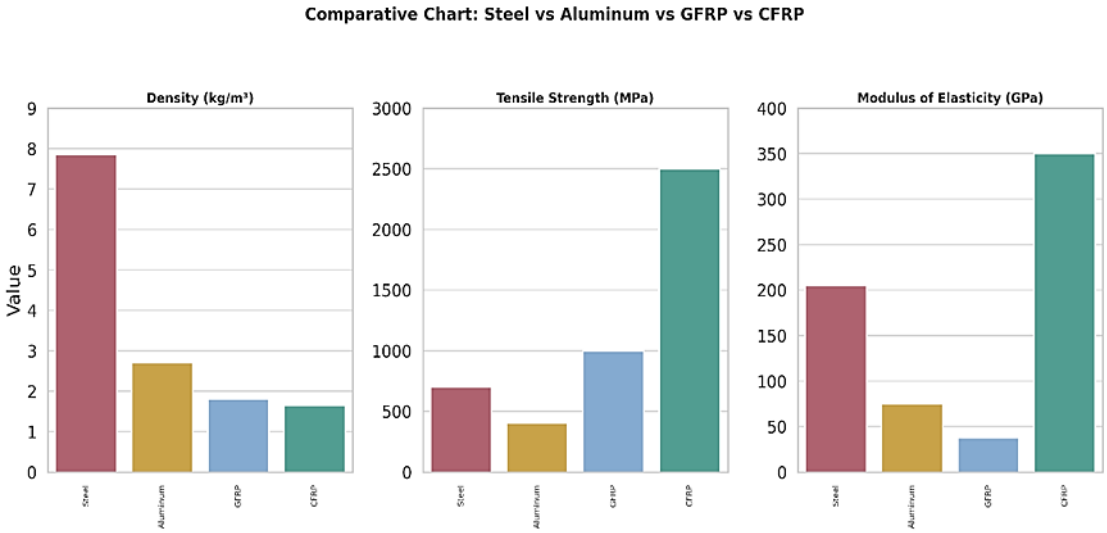
شكل 6: يعرض مقارنة بين المواد المركبة والمواد التقليدية من حيث الخصائص الميكانيكية.

يُظهر التحليل في الشكل (6) أن FRP Composites توفر مزيجًا مثاليًا من المتانة، وخفة الوزن، ومقاومة التآكل، مما يجعلها خيارًا استراتيجيًا للتطبيقات المتقدمة، لا سيما في الهياكل المعرضة للظروف البيئية القاسية، مثل المنشآت البحرية أو المكونات الهندسية في الطيران. وعلى الرغم من أن كلفته أعلى نسبيًا، إلا أن المزايا التشغيلية والتقليل من متطلبات الصيانة تجعله خيارًا فعالًا من حيث الكفاءة الاقتصادية على المدى البعيد.

6.6 مقارنة بين المواد المركبة (GFRP ,CFRP) والمواد التقليدية (الصلب، الالمونيوم)

جدول 5: يعرض مقارنة بين المواد البوليمرية المدعمة بالألياف، مثل الألياف الزجاجية (GFRP) والألياف الكربونية (CFRP)، والمواد التقليدية.

المادة	الكثافة (kg/m^3)	مقاومة الشد (ميجا باسكال)	معمل المرونة (جيجا باسكال)
الصلب	7.85	1000-400	210-200
الالمونيوم	2.7	550-250	80-70
GFRP	1.8-2	1500-500	50-25
CFRP	1.8-1.5	4000-1000	600-100



شكل 7: يوضح مقارنة بين المواد البوليمرية المدعمة بألياف الزجاج (GFRP) وألياف الكربون (CFRP) والمواد التقليدية.

تشير نتائج التحليل في الشكل (7) إلى أن المواد المركبة خصوصًا CFRP تقدم مزيجًا فريدًا من الصلابة العالية، القوة الكبيرة، وخفة الوزن .لذلك فهي مناسبة للتطبيقات عالية الأداء التي تتطلب تحسين نسبة القوة إلى الوزن مثل:

- الطيران والفضاء
- السيارات الرياضية
- المنشآت البحرية والهياكل المعرضة للبيئات القاسية

في المقابل، لا تزال الصلب والألومنيوم مفضلتين في العديد من التطبيقات بسبب تكلفتهما المنخفضة وسهولة التصنيع، لكن أداؤهما يكون أقل من المواد المركبة عندما يتعلق الأمر بالتطبيقات المتقدمة.

7- طرق تصنيع المواد المركبة

تختلف طرق تصنيع المواد المركبة حسب نوع المادة الأساس (Matrix) ومواد التعزيز(Reinforcement) ، وكذلك حسب التطبيق النهائي المطلوب. فيما يلي أهم التقنيات المستخدمة في صناعة المواد المركبة:

1.7. التشكيل بالحقن(Injection Molding)

الوصف:

- تُحقن المادة البوليمرية المصهورة (مثل البلاستيك الحراري) مع الألياف (قصيرة أو طويلة) داخل قالب مغلق تحت ضغط عالٍ.
- تُستخدم للحصول على أشكال معقدة بدقة عالية.

المميزات:

إنتاج كميات كبيرة بسرعة.
دقة عالية في الأبعاد.
إمكانية دمج ألياف قصيرة أو جسيمات نانوية.

العيوب:

محدودية طول الألياف (عادةً قصيرة).
تكلفة القوالب مرتفعة.

التطبيقات:
- قطع السيارات (لوحات العدادات، مقابض الأبواب).
- الإلكترونيات (أغلفة الهواتف، أجزاء الكمبيوتر).

2.7- التشكيل بالطبقة الأحادية(Hand Lay-up / Manual Lay-up)

الوصف:
- تُرصّ طبقات من الألياف (مثل الزجاج أو الكربون) يدوياً داخل قالب، ثم تُشبع براتنج (مثل الإيبوكسي أو البوليستر).
- تُستخدم أحياناً فرشاة أو بكرات لإزالة فقاعات الهواء.

المميزات:
مناسبة للنماذج الأولية والأجزاء الكبيرة.
تكلفة منخفضة للمعدات.

العيوب:
جودة المنتج تعتمد على مهارة العامل.
بطء في الإنتاج.

التطبيقات:
- هياكل القوارب.
- أجزاء الطائرات الصغيرة

3.7- التصنيع بالتفريغ(Vacuum Bag Molding)

الوصف:
- تُغطى طبقات الألياف المشبعة بالراتنج بكيس بلاستيكي، ثم يُشفط الهواء لإنشاء ضغط تفريغي.
- يُستخدم أحياناً فرن (أوتوكلاف) لتحسين الخصائص الميكانيكية.

المميزات:
تحسين التماسك بين الألياف والمصفوفة.
تقليل فقاعات الهواء.

العيوب:
تكلفة أعلى من الطبقة الأحادية التقليدية.

التطبيقات:
- مكونات الطائرات (لوحات التحكم، أجنحة).
- قطع الدراجات عالية الأداء

4.7- التشكيل بالبثق(Pultrusion)

الوصف:
- تُسحب الألياف المستمرة (مثل الكربون أو الزجاج) عبر حمام راتنج، ثم تُمرر عبر قالب ساخن للتصلب.
- تُنتج أجزاء ذات مقطع عرضي ثابت (مثل القضبان والأنابيب).

المميزات:
إنتاج مستمر وسريع.
قوة عالية في اتجاه الألياف.

العيوب:
محدودية في الأشكال المعقدة.

التطبيقات:
- أعمدة الإنارة.
- أجزاء الجسور الخفيف

5.7- التشكيل باللف(Filament Winding)

الوصف:
- تُلف الألياف المشبعة بالراتنج حول قالب دوار بزوايا محددة لتحقيق خصائص ميكانيكية معينة.

المميزات:
تحكم دقيق في اتجاه الألياف.
مناسب للأشكال الأسطوانية.

العيوب:
يحتاج إلى معدات متخصصة.

التطبيقات:
- خزانات الضغط (غاز، وقود).
- أنابيب النفط والغاز.

6.7- التشكيل بالضغط الحراري(Compression Molding)

الوصف:

- توضع مادة مركبة (مثل ألياف + راتنج) داخل قالب وتسخن ثم تضغط لصنع الشكل المطلوب.

المميزات:

إنتاج أجزاء متينة.

مناسب للمواد ذات الألياف الطويلة.

العيوب:

زمن دورة إنتاج طويل نسبياً.

التطبيقات:

- أجزاء السيارات (مصدات، ألواح الجسم).
- أجزاء الطائرات الداخلية.

7.7- الطباعة ثلاثية الأبعاد(3D Printing of Composites)

الوصف:

- تُستخدم طابعات 3 Dلبناء طبقات من المواد المركبة (مثل البوليمرات المدعمة بألياف قصيرة).

المميزات:

تصميمات معقدة دون الحاجة لقوالب.

تخصيص عالٍ.

العيوب:

قوة ميكانيكية أقل من الطرق التقليدية.

التطبيقات:

- النماذج الأولية السريعة.
- قطع الغيار المخصصة.

8- دراسة حالة: استخدام ألياف الكربون في تصنيع مكونات السيارات

شهد قطاع صناعة السيارات تطورًا كبيرًا في استخدام المواد المركبة، وخاصة ألياف الكربون المدعّمة بالبوليمرات - Carbon Fiber Reinforced Polymers) (CFRP، نظرًا لما توفره من نسبة عالية بين القوة والوزن، ومقاومة ممتازة للتآكل، وصلابة ميكانيكية فائقة .وقد أصبح هذا النوع من المواد خيارًا مثاليًا في تصميم مكونات السيارات عالية الأداء، خصوصًا في صناعات السيارات الرياضية والفاخرة، وكذلك في المركبات الكهربائية الحديثة التي تسعى إلى تخفيف الوزن لتحسين كفاءة استهلاك الطاقة.

1.8. الهدف من الاستخدام:

الهدف الرئيسي من استخدام CFRP في السيارات هو تقليل الوزن دون التأثير على الصلابة أو السلامة .فكلما قل وزن السيارة، قلت الطاقة المطلوبة لتحريكها، مما ينعكس مباشرة على تحسين كفاءة الوقود أو عمر البطارية في السيارات الكهربائية، وبالتالي تقليل الانبعاثات الكربونية.

2.8. التطبيق الفعلي:

من أبرز الأمثلة الواقعية على استخدام ألياف الكربون هو شركةBMW ، التي طبّقت هذه التقنية في طرازها الكهربائي BMW i3وi8، حيث تم تصنيع الهيكل الأساسي (Life Module)باستخدامCFRP ، مما ساعد في خفض الوزن الإجمالي بنسبة تصل إلى 250كجم مقارنة بهياكل الألمنيوم أو الفولاذ التقليدية.

المكونات المصنوعة من:CFRP

- الأبواب والأجنحة الخارجية.
- مكونات الهيكل السفلي والعلوي.
- غطاء المحرك والألواح الداخلية.
- دعائم الأمان الجانبية.(Side impact beams)

7.8- نتائج الاداء

- تحسين كفاءة استهلاك الوقود بنسبة تصل إلى 15.%
- تقليل زمن التسارع بسبب خفة الوزن.
- تحسين الثبات على السرعات العالية بسبب التوزيع الأفضل للوزن.
- الحفاظ على مستوى عالٍ من الأمان بفضل امتصاص الصدمات العالية لألياف الكربون.

4.8- التحديات

على الرغم من المزايا الكبيرة، فإن هناك تحديات تواجه استخدام CFRP في صناعة السيارات، مثل:

- ارتفاع تكلفة الإنتاج مقارنة بالفولاذ أو الألمنيوم.
- صعوبة في الإصلاح بعد الحوادث، إذ تتطلب المواد المركبة عمليات خاصة للكشف عن الضرر وإصلاحه.
- تعقيدات في إعادة التدوير، مما يتطلب تطوير تقنيات جديدة لجعل الصناعة مستدامة بيئيًا.

5.7- التوجيهات المستقبلية

- تسعى الشركات حاليًا إلى تطوير طرق إنتاج أوتوماتيكية منخفضة التكلفة، مثل تقنيات التصفيح السريع وحقن الراتنج.
- التركيز على CFRPالمعاد تدويره (Recycled Carbon Fiber)لاستخدامه في أجزاء غير هيكلية.
- دمج الألياف الذكية داخل CFRP لرصد الإجهادات والتلف بشكل فوري.

وهذه مقارنة لدراسة الحالة السابقة توضح الفروق في الاستخدام لمجموعة خواص:

جدول 6: يعرض مقارنة بين السيارات المصنعة بتقنيات تقليدية باستخدام الفولاذ أو الألمنيوم، والسيارات المصنوعة من المواد المركبة المدعمة بألياف الكربون (CFRP) مثل سيارات BMW i3 و. BMW i8.

العنصر	سيارات بتقنية تقليدية (فولاذ/ الومنيوم)	سيارات مصنوعة من (CFRP) (BMW i3/i8)
الوزن الكلي	1500 - 1200كجم	حوالي 1195 كجم لـ – i3 تخفيض حتى 250 كجم
علاقة القوة إلى الوزن	تتطلب محركات أقوى لتعويض الوزن	تؤدي إلى تسارع أفضل وكفاءة في الأداء
كفاءة استهلاك الوقود	14 - 12كم/لتر (بنزين) أو 160-180 واط/كم (كهرباء)	20كم/لتر أو 130-140 واط/كم بفضل الوزن الخفيف
السلامة والصلابة الهيكلية	جيدة، تعتمد على سماكة المعدن	ممتازة، CFRPيمتص الطاقة بكفاءة ويزيد من صلابة المقصورة
قابلية الإصلاح بعد الحوادث	سهلة، متوفرة ورش التصليح	صعبة، تتطلب معدات وتقنيات خاصة للكشف والإصلاح
التكلفة	أقل، وتتوفر مواد التصنيع والصيانة بسهولة	أعلى، بسبب تكلفة CFRP وتقنيات التصنيع المتقدمة
الأثر البيئي	إعادة التدوير أسهل ولكن الانبعاثات أعلى	أقل انبعاثات خلال الاستخدام، ولكن تحديات في التدوير
العمر الافتراضي للهيكل	متوسطة – عرضة للصدأ والتآكل	أطول – مقاومة للتآكل والظروف البيئية
التصميم والمرونة	محدود نسبيًا بالمعادن	عالي، CFRPيسمح بتصاميم ديناميكية أخف وأكثر مرونة

9. التحديات المستقبلية في المواد المركبة

على الرغم من المزايا العديدة التي تقدمها المواد المركبة، إلا أن هناك عدة تحديات قد تواجه استخدامها في المستقبل:

1.9. التكلفة المرتفعة: على الرغم من أن المواد المركبة تقدم خصائص فائقة، إلا أن تكلفة تصنيعها لا تزال أعلى مقارنة بالمواد التقليدية مثل الفولاذ والألمنيوم. هذه التكلفة المرتفعة تؤثر على استخدامها في الصناعات ذات الكلفة المحدودة.

2.9. التصنيع المعقد: عملية تصنيع المواد المركبة تتطلب تقنيات متقدمة وتدريبًا متخصصًا. على الرغم من أن بعض التقنيات مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد قد سهلت هذه العملية، إلا أنها لا تزال تتطلب استثمارات ضخمة في المعدات والتكنولوجيا.

3.9. الاستدامة البيئية: نظرًا لأن المواد المركبة غالبًا ما تحتوي على ألياف اصطناعية ومواد غير قابلة للتحلل بسهولة، فإن التخلص منها يشكل تحديًا بيئيًا. هناك حاجة إلى البحث المستمر لإيجاد حلول بيئية لتحسين قابلية إعادة التدوير لهذه المواد.

10. تطبيقات المواد المركبة في المستقبل

مع استمرار الابتكار في مجال المواد المركبة، يتوقع أن تتوسع التطبيقات المستقبلية لتشمل مجالات جديدة. تتوقع الأبحاث الحالية أن يتم استخدامها بشكل أكبر في:

1. الطاقة المتجددة: يُتوقع أن تكون المواد المركبة جزءًا مهمًا من تقنيات الطاقة المتجددة مثل توربينات الرياح. هذه المواد تساعد في تقليل الوزن وتحسين الكفاءة في تحويل الطاقة [12].
2. التكنولوجيا البيئية: بما أن المواد المركبة يمكن أن توفر حلولًا مستدامة، فإن هناك إمكانات كبيرة لاستخدامها في مجالات مثل حاويات التخزين للأغذية والمواد الكيميائية والمنتجات القابلة لإعادة التدوير [13]
3. الأجهزة الإلكترونية: يمكن أن تُستخدم المواد المركبة في تصنيع الأجزاء الإلكترونية والخلوية بفضل قدرتها على التكيف مع درجات الحرارة العالية والمقاومة للصدأ[14].

11. الاتجاهات المستقبلية

1. **المواد المركبة الذكية:**
   ألياف مزودة بأجهزة استشعار لرصد الإجهاد (مثال: حساسات الطائرات).
2. **الاستدامة:**
   تطوير راتنجات قابلة للتحلل من مصادر نباتية.
3. **التصنيع الآلي:**
   روبوتات لتركيب الألياف بدقة متناهية (توفير 30% وقت التصنيع).

12. الاستنتاجات:

في نهاية هذه الدراسة، يمكن القول بأن المواد المركبة هي مادة المستقبل في العديد من التطبيقات الهندسية بفضل خصائصها المتفوقة على المواد التقليدية. تعد هذه المواد مثالية لتقليل الوزن مع الحفاظ على الأداء الميكانيكي العالي. ومع ذلك، يجب التغلب على بعض التحديات المتعلقة بتكلفتها وعمليات تصنيعها من أجل تعزيز استخدامها على نطاق واسع في مختلف الصناعات.

من خلال هذا البحث، تبين أن المواد المركبة تفتح آفاقًا واسعة للابتكار في تصميم المنتجات وتحقيق كفاءة عالية. كما توفر هذه المواد حلولًا متعددة في مجالات متعددة، من الطيران إلى التطبيقات الطبية. على الرغم من التحديات الموجودة، فإن التطور المستمر في تقنيات تصنيع المواد المركبة يَعِدُ بمستقبل مشرق لهذه المواد في المستقبل:

يمكن حصر المضمون في النقاط التالية:

1- **تعدد استخدامات المواد المركبة** :أوضحت الدراسة أن المواد المركبة تقدم خصائص ميكانيكية متقدمة مثل القوة العالية والوزن المنخفض، مما يجعلها مثالية لتطبيقات في صناعات متعددة مثل الطيران، السيارات، والهندسة البحرية.

2- **تحسين الأداء الهندسي** :أثبتت المواد المركبة فعاليتها في زيادة الكفاءة الحرارية والميكانيكية مقارنة بالمواد التقليدية مثل الفولاذ والألمنيوم، خاصة في ظروف التشغيل القاسية.

3- **مرونة في التصنيع** :توفر المواد المركبة تقنيات تصنيع متعددة مثل التشكيل اليدوي، القولبة بالحرارة، والبثق، مما يسمح بتصميم منتجات معقدة بدقة عالية.

4- **التطورات الحديثة** :شهدت السنوات الأخيرة تقدمًا كبيرًا في تطوير المواد المركبة النانوية، مما حسّن من مقاومتها للحرارة والتآكل والاهتزازات، ووسع من تطبيقاتها في التكنولوجيا المتقدمة.

5- **التحديات الحالية** :رغم المزايا، تواجه المواد المركبة تحديات تتعلق بالتكلفة العالية، وصعوبة إعادة التدوير، ووجود فجوات معرفية في فهم آليات الفشل.

6- **آفاق البحث المستقبلية** :توصي الدراسة بزيادة التركيز على مواد مركبة ذكية (Smart Composites) يمكنها التفاعل مع البيئة المحيطة وتعديل خصائصها تلقائيًا، مثل المواد ذاتية الترميم.

المراجـــع:

[1] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.). Wiley.
[2] Mallick, P. K. (2018). Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design (3rd ed.). CRC Press.
[3] Strong, A. B. (2008). Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications (2nd ed.). Society of Manufacturing Engineers.
[4] Zhang, H., Wang, P., & Chen, Y. (2019). Recent Advances in Smart Composite Materials: Structure and Applications. Composite Structures, 220, 85–104.
[5] Mallick, P. K. (2007). Fiber-Reinforced Composites. CRC Press.
[6] Callister, W. D. (2005). Materials Science and Engineering. Wiley
[7] https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-metal-matrix-composite-sample-TiNi-CSP3_fig4_342325654.
[8] Kaw, A. K. (2006). Mechanics of Composite Materials. CRC Press.
[9] SEM images of ceramic-metal composites microstructures: (A) composite... | Download Scientific Diagram
[10] Mallick, P. K. (2007). Fiber-Reinforced Composites. CRC Press.
[11] Gibson, R. F. (2010). Principles of Composite Materials Mechanics. CRC Press
[12] Barbero, E. J. (2011). Introduction to Composite Materials Design. CRC Press
[13] Huang, Y., et al. (2020). Advances in 3D Printing of Composites. Springer
[14] Gibson, R. F. (2010). Principles of Composite Materials Mechanics. CRC Press