

المواد والحضارة البشرية: من صروح العمارة الضخمة إلى تصميم

المواد على المستوى النانومتري

د. رفيع جبره

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق - سوريا

(material)، وفي نقل الطاقة والمعلومات وتخزينها على شكل طاقة أو ضوء أو حرارة في المواد الهندسية الوظيفية (functional material). وفي هذا السياق، يأتي التمييز بين مواد أولية (raw materials)، ومواد هندسية (materials)، ومواد طبيعية (natural materials)، ومواد صناعية (synthetic materials)، ومواد عضوية (organic materials)، ومواد لا عضوية (inorganic materials)، ومواد حية (living materials)، ومواد غير حية (nonliving materials)، ومواد حيوية (biomaterials).

1. المواد والتطور التكنولوجي.

منذ العصر الحجري مروراً بعصري البرونز والحديد وصولاً إلى عصر السيليكون اليوم، ارتبط كل تقدم كبير في الحضارة الإنسانية بتحقيق تطور أساسي في علم المواد. لقد تزامن الانتقال من مجتمع الصيد وجمع الثمار إلى اعتماد الزراعة في ثورة العصر الحجري الحديث مع التطور في طرائق التعامل مع المواد الطبيعية كالحجر، مما أتاح إنتاج أدوات الطحن أو القطع. أدى اكتشاف المواد المركبة، على سبيل المثال، إلى ربط شفرات حجرية بمقابض خشبية مزودة بألياف أو راتنجيات، مما وقّر

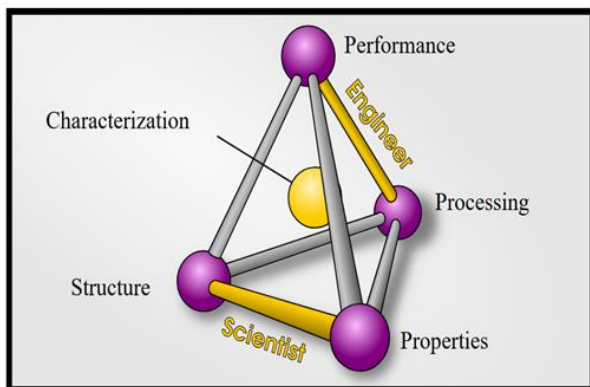
على مر العصور، لطالما استجابت المواد لطموحات البشرية في تشييد صروح العمارة الضخمة من سور الصين العظيم وأهرامات مصر الشامخة إلى برج خليفة في دبي والجسر المعلق في مدينة ميو (Millau) - في فرنسا. ولعلّ ما يسترعي الانتباه كلمة المواد في صيغة الجمع (materials) ومفردتها كلمة مادة، وهي ثنائية الدلالة لأنها تقابل على السواء تعبير (matter) و (material). وللتمييز بين هذين المصطلحين، يأتي مقترح مصطلح مادة هندسية مقابل تعبير (material)، وحصر تعبير مادة مقابل تعبير (matter). وينسجم ذلك مع مصطلحات راسخة مثل مصطلح فيزياء المادة الكثيفة (condensed matter physics)، ومصطلح فيزياء المادة الطرية (soft matter physics). والمادة الهندسية هي كل مادة تدخل في تصنيع منتج ذي تطبيق محدد مهما كانت درجة تطوره وتعقيده. ويمتد تعبير منتج من مستوى العنصر (component) الميكانيكي أو الكهربائي أو الكيميائي إلى مستوى الجهاز (equipment)، فالنظام (system)، وحتى البنية الإنشائية (structure). وبإيجاز، فالمادة الهندسية هي المادة التي تؤدي وظيفة (function) تتمثل في نقل القوى ومقاومتها في المواد الهندسية الإنشائية (structural

المواد الهندسية تطور البشرية التقاني الذي اعتمد على خصائص المواد الطبيعية وسلوكها، وعلى تطور قدرة الإنسان على تكييف هذه المواد، ومن ثم تحويلها، وأخيراً الجمع فيما بينها لتلبية حاجاته المتزايدة في المأكل والملبس والمأوى والأمان. وإذا تخيلنا صورة الأرض بعد الانفجار العظيم، فقد كانت على الأرجح خالية من المواد الهندسية التي ترافق ظهورها مع بداية ظهور شروط الحياة على الأرض، وما نتج عنها من عوامل ميكانيكية وكيميائية وحرارية ساعدت على تشكّل أشكال المواد البدائية مثل الصخور والحجارة والمساحيق الترابية. ولا بد أن الإنسان البدائي قد تلمّس بالحس بعض المفاهيم الحديثة في سلوك المواد مثل القصفية (brittleness) في الحجارة والصخور، واللدونة (plasticity) في مزيج التربة والماء، وفي بعض المعادن الطبيعية (native metals)، وهذا ما ساعده على تشكيل أدواته البدائية للقص والقطع والدفاع عن النفس بالاعتماد على الكسر القصف في الصخور والحجارة، ومن ثم الاستفادة من لدونة عجينة التربة والماء لتشكيل الأدوات الفخارية البدائية، ومن لدونة المعادن الطبيعية الأولية في ظهور عصور تعدين النحاس والبرونز والحديد.

وقد كانت لحضارات الشرق مساهمات بارزة في تطوير المواد الهندسية في جميع عصور الحضارة البشرية، فالشواهد التاريخية على تطوير الزجاج تعود إلى بلاد الشام، أو بلاد ما بين النهرين، أو بلاد حوض النيل. ويتفق جميع المؤرخين على أن تقنية نفخ الزجاج (glass blowing) تُنسب إلى الفينيقيين في النصف الأول من القرن الميلادي الأول، ولا تزال هذه التقنية تهيمن على جميع طرائق تشكيل كل منتجات الزجاج المجوف. وإذ يرجع ظهور الخزف، وفقاً لدراسات حديثة، في مناطق جغرافية مختلفة وعند ثقافات متعددة إلى حقبة الصيد

مقاومة إضافية على الأدوات اليدوية. كانت المعادن في البداية نادرة، وكانت قطع النحاس والفضة والذهب المحلية تُستخدم في المقام الأول للزينة والأغراض الاحتفالية. لكن اكتشاف عملية الصهر لاستخراج المعادن من الخامات المعدنية بشرّ بعصر جديد، هو عصر البرونز، المرتبط بتأسيس المدن وبداية الحرف والتجارة. من الصعب تقدير مدى التقدم الملحوظ الذي يمثله تطوير البرونز في علم المعادن الأساسي. أولاً، تتطلب عملية الصهر درجات حرارة أعلى من درجة انصهار المعدن (حوالي 1000 درجة مئوية للنحاس)، بالإضافة إلى جو مُرجع، وهي شروط ربما وُجدت صدفة لأول مرة في أفران شي الخزف. ثانياً، تتجم الخصائص المميزة للبرونز عن مزج عناصر معادن مختلفة (في هذه الحالة النحاس والقصدير)، ولا تزال الفيزياء الأساسية التي تشرح سبب تحسين التسبيك لسلوكه موضوعاً لاهتمام بحثي مُعاصر! ومن الواضح أنه لولا اكتشاف هذه المادة الأساسية، الذي أدى إلى تغيير كامل في مسار تطور التقدم البشري، لكان العالم اليوم مختلفاً عما نعرفه الآن. وفيما بعد، أدى اعتماد الحديد - الذي يمكن تطريقه بدلاً من صبه - في العصر الحديدي إلى تغييرات جذرية في الزراعة، وبالطبع في صناعة الأسلحة، مما أدى إلى تأسيس دول وإمبراطوريات، وتزامن مع بداية الأدب المُدوّن. ومن المثير للاهتمام أن العديد من هذه التطورات العلمية المُبكرة انتشرت من خلال التجارة، أو ما نسميه الآن التعاون الدولي. ولا يزال الفولاذ يلعب دوراً محورياً على مر التاريخ، ويبلغ ذروته بعد حوالي 4000 عام من التطورات في علم المعادن مع الثورة الصناعية. وإذ ارتبط مصير البشرية بالمواد منذ فجر التاريخ، فقد نُسبت عصور الحضارة البشرية إلى المادة الهندسية المهيمنة في كل عصر، وهكذا برزت مفاهيم العصر الحجري وعصر البرونز وعصر الحديد، وواكبت

(characterization) وطرائقه خلال القرن العشرين، ولا سيما انعراج الأشعة السينية، والمجهر الإلكتروني، ومجس التحليل الإلكتروني، وطرائق التحليل الحراري، في تعميق هذه المفاهيم وترسيخها ومواكبة تطور علم المواد الجديد. ويعود ظهور هذا العلم وتطوره من جهة إلى تطوير تدريجي حدث في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين نتج عنه إقامة مقارنة علمية منهجية شاملة لدراسة أي مادة هندسية وتطويرها. وتقوم هذه المقارنة على ما سُمي رباعي وجوه المواد الذي يشتمل على أربعة عناصر تلبي متطلبات تطوير أي مادة هندسية ودراستها، وهي طريقة التصنيع، والبنية المجهرية، والخصائص، والأداء.



رباعية البنية والخصائص والسلوك وتكنولوجيا التصنيع.

من جهة أخرى، إذا كانت المنتجات التقنية في عصور الحضارة البشرية السابقة تقتصر على مادة هندسية واحدة، أو عدد صغير منها، فإن المنتجات التقنية الحديثة تشتمل على عدد متزايد من المواد الهندسية، فالسيارة والطائرة والدارة المتكاملة، رغم صغر أبعادها المجهرية، تحتوي على مواد معدنية، ومواد بوليميرية، ومواد سيراميكية وزجاجية، ومواد نصف ناقلة، أي جميع عائلات المواد الهندسية، وذلك لتحقيق وظائف محددة بأقل التكاليف، وأطول عمر خدمة. وبدلاً من تأهيل مختص في كل عائلة مواد، يسمح علم المواد وهندستها في تأهيل

والقطاف، ويقترن تطوره بحقبة استقرار البشر، فقد مثّل تطوير البورسلين الصيني، واقتناؤه في خزائن الأسر الملكية الحاكمة حافزاً لتقليده واقتنائه في القرن التاسع عشر لدى عدد من ممالك أوروبا ودوقياتها. وفي الطريق بين الصين شرقاً وأوروبا غرباً، برزت مساهمات العالمين الإسلامي والعربي في تقانة الخزف من خلال تطوير البلاط الخزفي الفاشاني نسبة إلى مدينة كاشان في إيران، والبلاط الخزفي ايزنيك نسبة إلى مدينة ايزنيك في تركيا، والطلاء المعدني اللامع (luster) أثناء الخلافة العباسية. وعلى الرغم من مرور ألفيات على تعدين النحاس والبرونز والحديد، شكّل تطوير السيف الدمشقي وتصنيعه نقلة نوعية في علم التعدين الحديث، حيث قادت دراسة خصائص فولاذ هذا السيف وبنيته إلى إقامة الترابط بين بنية هذه المادة الهندسية المجهرية، وخصائصها العيانية، وأدائها، وطرائق تصنيعها من عمليات إحماء وإسقاء وتطريق متكررة.

2. نشأة علم المواد.

يقود ما سبق إلى منشأ علم المواد ومجاله العلمي والتقني. وعلى الرغم من العلاقة الأزلية بين عصور الحضارة البشرية والمواد الهندسية، يعود ظهور علم المواد فقط إلى ستينيات القرن العشرين في بعض الجامعات الأمريكية وبعض مراكز البحوث في شركاتها الكبرى. ويرى Robert W Cahn، أحد كبار علم المواد، أن علم التعدين (metallurgy)، وخاصة علم التعدين الفيزيائي (physical metallurgy)، هو الأب الروحي لعلم المواد من خلال مفاهيم مخططات الأطوار واستثمارها، وتحولات الأطوار، والسيطرة على الإشابة (doping) والنقاوة (purity)، وأخيراً، دراسة البنية المجهرية وفهمها والتحكم بها. ولقد ساهم تطور وسائل التوصيف

3. طيف المواد الهندسية في الصناعة والاقتصاد.

جاء ظهور علم المواد وتطوره تنويعاً لعصور الحضارة البشرية، حيث توسّع طيف المواد الهندسية من عدد محدود يقتصر على الصخور والحجارة والغضار والجلد والخشب وغيرها من المواد الطبيعية إلى عددٍ ينوف على 160000 مادة هندسية يمكن تصنيفها ضمن عائلات المواد الهندسية الرئيسية، وهي: المواد المعدنية والسبائك (metallic materials and alloys)؛ المواد السيراميكية والزجاجية (ceramic and glass)؛ المواد البوليميرية (polymeric materials)؛ المواد المركبة (materials composite)؛ ويعتمد هذا التصنيف على نوع الرابطة الكيميائية في كل عائلة من المواد الهندسية، وطبيعة هذه الرابطة، وعلى التشابه في الخصائص والسلوك بين مواد كل عائلة. وهكذا، لا منافس للمعادن والسبائك في الناقلية الكهربائية والحرارية واللدونة والمطاوعة، ولا منازع للمواد السيراميكية في القساوة والمقاومة الحرارية والكيميائية، ولا شريك للزجاج في الشفافية والتلون وإظهار مفاتن الضوء وسحره وجماليته، ولا بديل للمواد البوليميرية في خفة الوزن وقابلية التشكيل وتعدّد المنتجات، ولا مثيل للمواد المركبة في مقاومة التعب (fatigue) وخفة الوزن والاستجابة لمتطلبات التصميم.

وتشهد قطاعات الاقتصاد والصناعة والانتاج على توسّع طيف المواد الهندسية وانتشارها، وخير دليل على ذلك المقارنة بين المواد المستعملة في صروح الحضارة البشرية التاريخية مثل الأهرامات في مصر، وسور الصين العظيم، وبرج إيفل في فرنسا، وقصر الزجاج في لندن- بريطانيا، وفي المشاريع الهندسية المعاصرة مثل برج خليفة

مختص واحد يمكنه التعامل مع قضايا المواد المختلفة ومشاكلها.

وهكذا، ظهر علم المواد في الجامعات الأمريكية في مطلع ستينات القرن العشرين، وبدأ يتوسع في أوروبا والعالم في مطلع السبعينات. ويظهر ذلك جلياً في تغيير أسماء العديد من الأقسام الجامعية في العالم، وفي تطور توجهات مؤسسات علميتين شهيرتين، هما المدرسة العليا للمناجم في باريس- فرنسا، وقسم المواد في جامعة شفيلد- بريطانيا. بدأت مدرسة المناجم، كما يوحي اسمها، بالاهتمام بهندسة إقامة المناجم وتشبيدها واستثمارها، ثم تعمّقت في تطوير منتجاتها من معادن وسبائك ودراساتها (علم التعدين metallurgy)، وأخيراً، أصبحت من أهم مراكز البحث والتطوير في معالجة المواد البوليميرية وتقانات تشكيلها. أما قسم المواد في جامعة شفيلد، فقد بدأ في العقد الثالث من القرن العشرين كأول قسم جامعي يعني بتقانة الزجاج، ودراسة بنيته وخصائصه، ثم تطور نحو علم المواد وهندستها، بما في ذلك المواد المعدنية والسيراميكية والزجاجية والبوليميرية.

عرّفت الأكاديمية الوطنية في أمريكا علم المواد على أنه العلم الذي "يعنى بتوليد المعارف التي تربط بين تركيب المواد وبنيتها وطريقة تصنيعها وخصائصها واستعمالاتها، وتطبيق هذه المعارف" على المواد الهندسية، مهما كان منشؤها وطبيعتها. وإذا كانت بعض الاختصاصات العلمية تُشتق من اختصاصات أساسية، فإن علم المواد يتسم بطبيعة جامعة متعددة الاختصاص، لأنه يستند على علوم أساسية، مثل الكيمياء والفيزياء والميكانيك والرياضيات، ويُعدّ صلة وصل بينها وبين العلوم الهندسية، مثل الهندسة الكيميائية، والهندسة الميكانيكية، وهندسة التعدين وغيرها.

والتعليب المعدني، والتعليب في الزجاج، وتكون الغلبة لصالح الميزات المتأصلة في كل مادة وبعض مُحَدِّداتها العملية. ومع هذا التزايد السكاني، وتوسُّع النشاطات الاقتصادية، تتفاقم قضية مصادر الطاقة. وفي هذا المجال، تستمر المواد الهندسية في تأدية دور مركزي في تلبية الحاجات المتزايدة لمصادر الطاقة التقليدية، ومصادر الطاقة البديلة، وذلك على جميع مستويات توليد الطاقة، وحفظها، وتوزيعها. ويتطلب تطوير الطاقة الشمسية مواد نصف ناقلة جديدة، وبطاريات تخزين الطاقة، ومكثفات فائقة، وغير ذلك. وفي مجال طاقة الرياح، يحتاج التوسُّع فيها إلى عفات ريحية خفيفة الوزن، ومنخفضة الكلفة، وعالية المردود والديمومة. وهنا، توفّر المواد المركبة (بوليمير - ألياف تقوية) بدائل مناسبة. وفيما يختص بالطاقة النووية، يمتد دور المواد الهندسية من المواد الإنشائية في شروط العمل القاسية في المفاعلات النووية، إلى حفظ النفايات النووية النشطة إشعاعياً، واحتضانها في مواد زجاجية تتحمّل ضررها الإشعاعي حتى تلاشيها.

4. من المواد الحجمية واسعة الإنتاج إلى المواد النانومترية محدودة الإنتاج.

ظهرت التكنولوجيا النانوية، التي يطلق عليها غالباً "علم الصغير"، كواحدة من أكثر التقنيات تحويلاً في القرن الحادي والعشرين. تعمل هذه التقنية عند مقياس النانو - جزء من المليار من المتر - وتتضمن معالجة المواد على المستوى الذري والجزيئي. من الطب والإلكترونيات إلى تطبيقات الطاقة والبيئة، تحمل التكنولوجيا النانوية وعداً بإحداث ثورة في قطاعات متعددة. ومع ذلك، فقد تشكّل تطورها من خلال التحديات العالمية الملحة، بما في ذلك الاستدامة البيئية وكفاءة الطاقة ومتطلبات الرعاية الصحية وندرة الموارد.

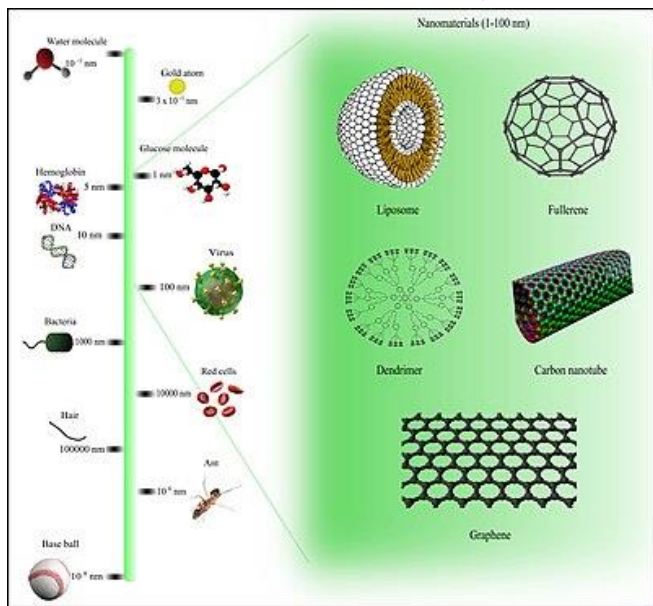
في الإمارات، والجسر المُعلّق في مدينة ميو (Millau) - فرنسا، ومحطة الفضاء الدولية. ولا تخلو أية منشأة مدنية معاصرة من جميع عائلات المواد الهندسية لمقاومة الحمولات، ولتوفير شبكة الكهرباء والاتصالات، وشبكة المياه والصرف الصحي. ويحلم الخيال البشري في تشييد أبنية المستقبل ذات الاكتفاء الذاتي طاقياً (energy self-sufficient buildings)، والجسور ذاتية الإصلاح (self-healing bridges).

لقد مكّنت السيطرة على الإشابة (doping) في المواد نصف الناقلة، والنقاوة (purity) في الزجاج خلال القرن العشرين من تطوير أنصاف النواقل، والدارات المتكاملة، والمعالجات الصغيرة، والألياف الضوئية، وشبكة الانترنت، والهواتف المحمولة التي أصبحت جميعها جزءاً لا يتجزأ من الحياة اليومية للبشر.

في قطاع النقل والمواصلات، تجتمع المواد الهندسية لإنجاز أعمال شق الطرقات وتعبيدها، وإنتاج جميع وسائل النقل من سيارات وقطارات وسفن وطائرات ومركبات فضاء، حيث تتضافر المواد الهندسية التقليدية والجديدة لتوفير سرعة التنقل والراحة والأمان. وفي قطاع الصحة، تتطور المواد الحيوية (biomaterials) الترميمية والتعويضية لتلبية حاجات طب الأسنان والجراحة العظمية وتوسيع الشرايين وصمّامات القلب الصناعية واستبدال الأنسجة وتجديدها، حتى أن مصطلحات جديدة بدأت في الظهور، مثل مصطلح هندسة الإلكترونيات الحيوية (bionics). ولتغذية نحو 10 مليار من البشر على وجه المعمورة في عام 2050، تلعب المواد الهندسية دوراً متنامياً في مجالات حفظ المواد الغذائية والمشروبات والأدوية، وتعليبها. وهنا، تبرز منافسة شديدة بين عائلات المواد الهندسية، وخاصة في خيارات التعليب البلاستيكي،

1.4. تاريخ التكنولوجيا النانوية وتعريفها.

تعود جذور التكنولوجيا النانوية إلى محاضرة ريتشارد فاينمان الشهيرة عام 1959، "هناك حيز كبير في القاع"، حيث تصوّر التعامل مع الذرات المنفردة لتحضير مواد جديدة. ومع ذلك، فإن مصطلح "تكنولوجيا النانو" صاغه نوريو تانيجوتشي (Norio Taniguchi) لأول مرة في عام 1974، في إشارة إلى التصنيع الدقيق على مقياس النانو. وتشمل المعالم المهمة اختراع المجهر النفقي الماسح (scanning tunneling microscope (STM) في عام 1981 ومجهر القوة الذرية (atomic force microscope (force microscope)، والذين سمحا للعلماء بمعاينة الذرات والتعامل معها، واكتشاف الفوليرين (fullerenes) (كرات البوكي) في عام 1985.



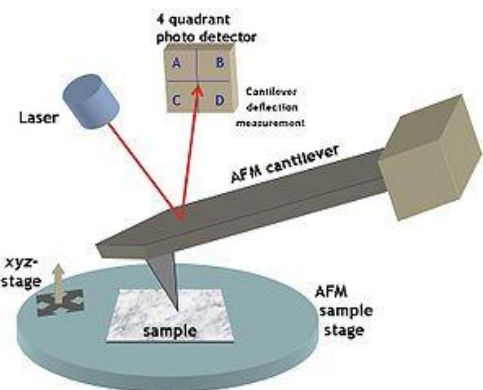
مقارنة أبعاد الأجسام النانوية.

تعريف تكنولوجيا النانو: القضايا والآفاق.

تقتصر تكنولوجيا النانو إلى تعريف متق عليه عالمياً، مما يُعقّد تنظيمها وتسويقها. وعلى نطاق واسع، تتطوي تكنولوجيا النانو على التعامل مع المواد التي تتمتع ببعد واحد على الأقل بين 1 و 100 نانومتر. وغالباً ما يختلف تعريف تكنولوجيا النانو بناءً على التركيز على التخصصات المختلفة:

العلوم الفيزيائية: يُركّز التعريف على البعد والتأثيرات الكمومية.

العلوم البيولوجية: يُركّز التعريف على العمليات النانوية في الأنظمة الحية.

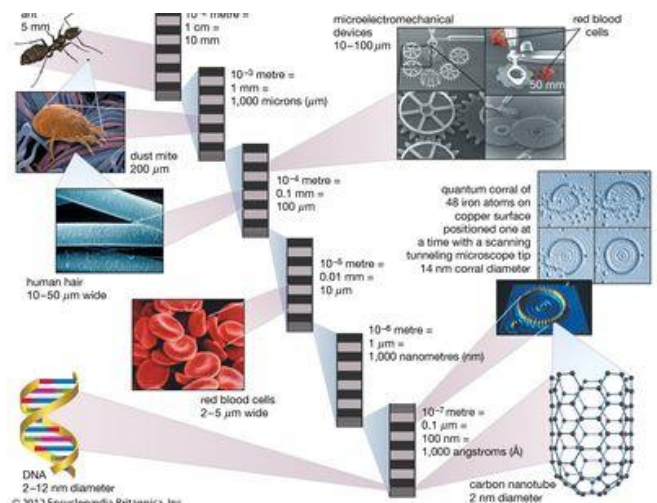


مخطط نموذجي لمجهر القوة الذرية. يتم انحراف ذراع صغير مصنوع بدقة عالية ذي طرف حاد بواسطة تضاريس سطح العينة، تماماً كما هو الحال في الفونوغراف ولكن على نطاق أصغر كثيراً. ينعكس شعاع الليزر عن الجانب الخلفي للذراع إلى مجموعة من أجهزة الكشف الضوئية، مما يسمح بقياس الانحراف وتجميعه في صورة لتضاريس السطح.

شهدت التسعينيات تطوير أنابيب الكربون النانوية والتقدم في تقنيات التصنيع على نطاق النانو. وبحلول العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، بدأت الحكومات في جميع أنحاء العالم في الاستثمار بكثافة في أبحاث

الهندسة: يُركّز التعريف على الاهتمام بتقنيات التصنيع النانوية.

يؤدي هذا الغموض التعريفي إلى تحديات في براءات الاختراع وتخصيص التمويل والاتصال العام بين الأطراف ذات الصلة. على سبيل المثال، يختلف الإطار التنظيمي للطب النانوي في إدارة الغذاء والدواء بشكل كبير عن الإطار التنظيمي للمواد النانوية في المنتجات الاستهلاكية في وكالة حماية البيئة.



تُظهر قوى 10 أمثلة من العوالم البيولوجية والميكانيكية "أوامر الحجم" المختلفة (قوى 10)، من 2-10 متر إلى 7-10 متر.

2.4. تطبيقات تكنولوجيا النانو عبر القطاعات الاقتصادية وسوق تكنولوجيا النانو.

تستفيد من إمكانات تكنولوجيا النانو قطاعات اقتصادية متعددة:

أ. الطب والرعاية الصحية:

- تساهم أنظمة توصيل الأدوية المستهدفة باستخدام الجسيمات النانوية على تحسين الفعالية وتقليل الآثار الجانبية.

- تسمح أجهزة الاستشعار النانوية من الكشف المبكر عن الأمراض بدقة عالية.

يُقدّر حجم سوق الطب النانوي بنحو 200 مليار دولار في عام 2023، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 12.1%.

ب. الطاقة:

- تساهم المواد النانوية في تعزيز كفاءة الألواح الشمسية وأجهزة تخزين الطاقة.
- تقلّل الطلاءات النانوية من ضياع الطاقة في العمليات الصناعية.

ت. البيئة:

- تُستعمل المواد النانوية في أنظمة تنقية المياه لإزالة الملوثات على المستوى الجزيئي.
- تحتجز أنابيب الكربون النانوية الغازات المسببة للاحتباس الحراري بكفاءة.

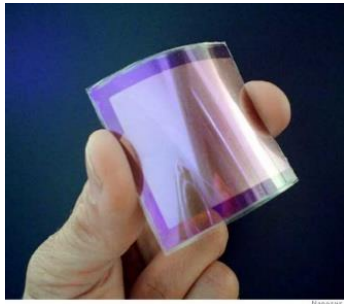
ث. الإلكترونيات:

- يردي وصول الترانزستورات في المعالجات إلى أبعاد النانو، إلى تحسين القدرة الحسابية.
- يجري تمكين الإلكترونيات المرنة والقابلة للارتداء باستعمال المواد النانوية.

ج. المنتجات الاستهلاكية:

- تدخل تكنولوجيا النانو في مستحضرات التجميل والمنسوجات وتغليف الأغذية لتحسين أدائها.

سوق تكنولوجيا النانو.



تتضمن أفلام الألواح الشمسية الجديدة جسيمات نانوية لإنشاء خلايا شمسية خفيفة الوزن ومرنة. (الصورة مقدمة من شركة نانوسيس (Nanosys).

ت. التصنيع والمواد:

- تُمكن التكنولوجيا النانوية من إنتاج مواد أخف وأقوى وأكثر متانة لصناعات الطيران والسيارات والبناء.
- تعمل تقنيات التصنيع بالإضافة (Additive manufacturing) التي تتضمن مواد نانوية على إعادة تشكيل عمليات الإنتاج، مما يوفر دقة أعلى ونفايات أقل.

ث. الإلكترونيات:

- تدعم تقنية النانو التقدم في التصغير، وهو أمر ضروري للإلكترونيات الحديثة مثل الهواتف الذكية وأجهزة الكمبيوتر المحمولة وأجهزة إنترنت الأشياء.
- كما أنها تدفع تطوير الإلكترونيات المرنة وأشباه الموصلات من الجيل التالي، وتلبية المطالب بزيادة القوة الحسابية وكفاءة الطاقة.

قُدِّرَت قيمة سوق تكنولوجيا النانو العالمية بنحو 2,1 تريليون دولار في عام 2023 ومن المتوقع أن تصل إلى 6 تريليون دولار بحلول عام 2030. وتشمل محركات النمو الرئيسية زيادة الإنفاق على البحث والتطوير، والتقدم في المواد النانوية، والطلب المتزايد على المنتجات عالية الأداء. وتتصدر منطقة آسيا والمحيط الهادئ السوق، حيث تُعدّ الصين واليابان من المساهمين الرئيسيين بسبب التمويل الحكومي الكبير والتطبيقات الصناعية.

3.4. أهمية تكنولوجيا النانو عبر القطاعات الاقتصادية وإنجازاتها الرئيسية.

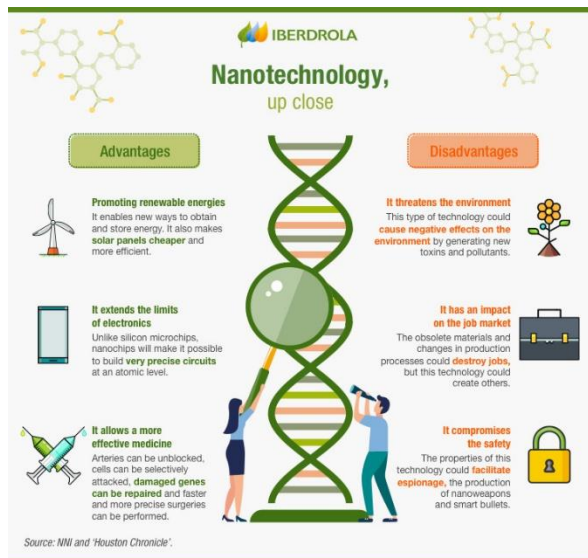
أ. الرعاية الصحية:

- تُعدّ تكنولوجيا النانو أمراً بالغ الأهمية في تطوير أدوات التشخيص المتقدمة، مثل أجهزة الاستشعار الحيوية النانوية وعوامل التصوير.
- يدعم سوق الطب النانوي، وهو جزء كبير، الاختراقات في علاج السرطان والطب التجديدي وأنظمة توصيل الأدوية.
- تعتمد المستشفيات وشركات الأدوية بشكل متزايد على الابتكارات النانوية لتحسين نتائج المرضى وخفض التكاليف.

ب. الطاقة:

- يستفيد قطاع الطاقة من تكنولوجيا النانو من خلال حلول الطاقة المتجددة المُحسَّنة، مثل الخلايا الكهروضوئية عالية الكفاءة والبطاريات عالية السعة.
- تدعم ابتكارات النانو التحول إلى أنظمة الطاقة المستدامة من خلال تقليل خسائر الطاقة وتعظيم قدرات التخزين.

مع تطبيقاتها الواسعة ونمو السوق، تُعدّ تقنية النانو حجر الزاوية في الابتكار، حيث تقدم حلولاً تحويلية تُعزّز الإنتاجية والاستدامة والقدرة التنافسية العالمية عبر القطاعات.



يعرض مايكل ليهير (Michael Liehr) من كلية علوم وهندسة النانو بجامعة ولاية نيويورك، على اليسار، وبالا هاراناند (Bala Haranand) من شركة أي بي إم رقاقة مكونة من شرائح 7 نانومتر في غرفة نظيفة بتقنية إن إف إكس (NFX) في ألباني، نيويورك. (الصورة مقدمة من أي بي إم).

ج . الزراعة والأغذية:

- تُعزّز تطبيقات تقنية النانو في الزراعة غلة المحاصيل من خلال التوصيل المستهدف للأسمدة والمبيدات الحشرية.
- في تكنولوجيا الأغذية، تعمل المواد النانوية على تحسين التعبئة والتغليف من خلال إطالة العمر الافتراضي وضمان سلامة الغذاء.

ح . التطبيقات البيئية:

- يشهد سوق المواد النانوية في معالجة البيئة نمواً مطرداً، مع حلول مبتكرة لتنقية الهواء ومعالجة المياه وإدارة النفايات.
- تؤكد تقنية النانو الخضراء على عمليات الإنتاج المستدامة، مما يُقلّل من البصمات البيئية عبر الصناعات.

مزايا تكنولوجيا النانو ومشاكلها.

الإنجازات والنتائج الرئيسية.

تتضمن بعض الإنجازات البارزة في مجال تكنولوجيا النانو ما يلي:

- **الجرافين:** تم اكتشاف هذه المادة الكربونية التي يبلغ سمكها ذرة واحدة في عام 2004، وهي أكبر متانة من الفولاذ بمقدار 200 مرة وتوصل الكهرباء بأقل قدر من المقاومة.
- **العلاج النانوي للسرطان:** لقد حسّنت الأدوية المُعدّنة من إدارة الغذاء والدواء الأمريكية القائمة على الجسيمات النانوية مثل دوكسيل (Doxil) نتائج علاج السرطان.

المستقبل القريب والبعيد لتكنولوجيا النانو.

أ . الآفاق القريبة الأجل:

- دمج تكنولوجيا النانو في الإلكترونيات الاستهلاكية والأجهزة القابلة للارتداء والمواد المتقدمة.
- تسويق الأدوية النانوية وأجهزة الاستشعار النانوية.

ب . الآفاق البعيدة الأجل:

- تطوير المُجمِّعات الجزيئية (molecular assemblers) للتصنيع من الأسفل إلى الأعلى.
- التنبؤ النطاق لتكنولوجيا النانو في استكشاف الفضاء، مما يتيح مواد خفيفة الوزن ومتينة.
- الأطر الأخلاقية والتنظيمية لمعالجة الآثار المترتبة على السلامة والمجتمع.

5. مواد جديدة خفيفة كالستايروفوم ومتينة كالفلوئاذ الكربوني.

لطالما كان الجمع بين الخفة والمتانة في علم المواد هدفاً سعت إليه مختلف الصناعات، من الفضاء إلى السيارات والبناء. تقليدياً، كانت المواد تُقدّم تنازلات: فالخفيفة غالباً ما تفتقر إلى المقاومة (مثل الرغوة والبلاستيك)، بينما تميل المواد المتينة إلى الكثافة والثقيل (مثل الفولاذ والتيتانيوم). ومع ذلك، فقد أتاح التطورات الحديثة في تكنولوجيا النانو والمواد الخارقة والتصميم الهيكلي تطوير مواد جديدة خفيفة كالستايروفوم ومتينة كالفلوئاذ الكربوني. يمكن لهذه الابتكارات أن تُحدث ثورة ليس فقط في الهندسة والتصنيع، بل أيضاً في الاستدامة العالمية من خلال توفير الوقود وخفض الانبعاثات. ووفقاً لتقرير ماكينزي لعام 2023، من المتوقع أن يتجاوز السوق العالمي للمواد المتقدمة خفيفة الوزن 250 مليار دولار

- السطوح ذاتية التنظيف: مستوحاة من أوراق اللوتس، تُستخدم هذه السطوح على نطاق واسع في صناعات البناء والسيارات والمُنشآت الطبية.

4.4. المشاكل الكبرى التي تدفع تطوير تكنولوجيا النانو ومستقبلها القريب والبعيد.

تتضمن التحديات العالمية التي تحفز نمو تكنولوجيا النانو ما يلي:

أ . أزمة الطاقة:

لقد أدت الحاجة إلى أنظمة طاقة متجددة وفعالة إلى دفع الابتكارات في المواد النانوية للبطاريات والخلايا الشمسية.

ب . متطلبات الرعاية الصحية:

يتطلب الانتشار المتزايد للأمراض المزمنة أدوات تشخيصية وعلاجية متقدمة.

ت. الاستدامة البيئية:

تتطلب معالجة ندرة المياه والتلوث أنظمة ترشيح ومعالجة تعتمد على تكنولوجيا النانو.

ث . ندرة الموارد:

تُمكن تكنولوجيا النانو من استبدال المواد وإعادة التدوير، مما يُقلّل من الاعتماد على الموارد النادرة.

ج . الأمن الغذائي:

تعمل تقنية التغليف النانوي على تعزيز توصيل العناصر الغذائية في الزراعة، وتعمل المواد النانوية على تحسين تغليف الأغذية للحد من التلف.

بدأت الرحلة في منتصف القرن العشرين مع الرغوات الاصطناعية مثل البولي يوريثان والبوليسترين الموسع (الستايروفوم)، والتي استُخدمت بشكل رئيسي للعزل والتغليف. ورغم خفة وزنها، كانت مقاومتها الميكانيكية منخفضة. في تسعينيات القرن الماضي، أدت التطورات في المحاكاة الحيوية والتصنيع النانوي إلى إلهامات تصميمية جديدة - من البنية الخلوية للخيزران إلى الهندسة الداخلية لعظام الطيور.

حدثت القفزة الحقيقية في العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين مع تطورات الشبكات النانوية والهلام الهوائي:

- 2011: كشفت مختبرات HRL عن أخف مادة - وهي شبكة دقيقة معدنية بكثافة 0.9 ملغم/سم³، أي ما يعادل واحداً على ألف من كثافة الفولاذ.

- 2014: ابتكر معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) رغوة جرافين فائقة الخفة تتميز بمقاومة ومرونة استثنائيتين.

- 2016-2022: بدأ تطوير المواد المركبة المقواة بأنابيب الكربون النانوية، والرغويات الخزفية والمعدنية المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، يكتسب اهتماماً صناعياً.

تم تقديم مواد هلامية هوائية قائمة على أنابيب الكربون النانوية، تتميز بصلابة شبيهة بالصلابة الفولاذية ووزن أقل بواحد من المائة.

2.5. النهج ومبادئ العمل في المواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة وأدوات تطويرها.

يكمن مبدأ العمل في التصميم الهندسي على حساب الكتلة - ما يُعرف بالمواد الميكانيكية الخارقة. فبدلاً من الاعتماد فقط على مقاومة المادة الجوهرية، يُصمَّم

بحلول عام 2030، مدفوعاً بشكل كبير بقطاع الفضاء والبنية التحتية الخضراء.



السيارات والمواد الجديدة.



صُنعت سيارة أودي RSQ باستخدام روبوتات كوكا الصناعية سريعة النمذجة.

1.5. مفهوم مواد جديدة خفيفة الوزن ومتينة.

يكمن جوهر هذه المواد الرائدة في تحقيق كثافة منخفضة (أقل من 100 كغ/م³) ونسب عالية من المقاومة إلى الوزن (تضاهي أو تتجاوز مقاومة الفولاذ الكربوني التي تبلغ حوالي 500 ميجا باسكال عند كثافة حوالي 7850 كغ/م³). ومن الأمثلة البارزة على ذلك الشبكات الدقيقة المعدنية فائقة الخفة، وهي هياكل هندسية تحاكي مواد طبيعية كالعظام أو الخشب، ولكن على نطاق مجهرى، مما يُحقق فوائد أداء فائقة. غالباً ما تتكون هذه المواد من معادن أو سيراميك أو بوليمرات أو مواد مركبة مرتبة في هيكل شبكي أو شبيه بالرغوة، مما يوفر متانة مع كتلة ضئيلة.

طُوِّرت شبكة دقيقة من النيكل، أخف وزناً بمئة مرة من الستايروفوم، وبقوة الفولاذ تحت الضغط.

تاريخ المواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة وتطورها.

أدوات ووسائل تطوير المواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة.

يتضمن إنتاج هذه المواد المتقدمة ما يلي:

- الطباعة الحجرية بشعاع الإلكترون والتليد بالليزر: للأنماط النانوية.

- الطحن باستخدام شعاع أيوني مُركّز: لنحت هندسي دقيق.

- الطابعات ثلاثية الأبعاد متعددة المواد: قادرة على مزج السيراميك والبوليمرات والمعادن.



نموذج محرك نفث مطبوع بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.

- المجهر الإلكتروني الماسح (SEM): لتحليل البنية الدقيقة وسلامتها.

- تحليل العناصر المنتهية (FEA): لمحاكاة الاستجابة الميكانيكية تحت الضغط.

ملاحظة اقتصادية: قد تصل تكلفة أدوات التصنيع النانوي ثلاثي الأبعاد المتقدمة إلى ما بين مليون وخمسة ملايين دولار أمريكي، إلا أن التوسع السريع ومكتبات التصميم

الباحثون دعامات مجهرية، وعوارض مجوفة، وهياكل شبكية لمقاومة الأحمال بكفاءة.

تشمل التقنيات الرئيسية ما يلي:

- **تحسين الطوبولوجيا:** تولّد خوارزميات الكمبيوتر ترتيبات هندسية مثالية للقوة وخفة الوزن.

- **التصنيع بالإضافة (الطباعة ثلاثية الأبعاد):** يُمكن من تصنيع دقيق لأشكال هندسية داخلية معقدة.

- **المحاكاة الحيوية:** محاكاة هياكل مُحسّنة طبيعياً مثل الدياتوميّات، والعظام الإسفنجية، وأقراص العسل.



جسر ستوفبروج [هولندا] في أمستردام، أول جسر معدني مطبوع بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.



المواد الجديدة وخفة الأحذية الرياضية.

مفتوحة المصدر تُخفّض التكاليف بنسبة تقارب ٢٠٪ سنوياً.

3.5. التنفيذ التجريبي لمواد جديدة خفيفة الوزن ومتينة ومزاياها.

قامت مختبرات حول العالم بتصنيع واختبار نماذج مختلفة:

- شبكة نيكل دقيقة (HRL) ، 2011 : (مضغوطة تحت ضغط 50% مع استعادة كاملة، مما يُظهر مرونة.
- هلاميات الجرافين الهوائية (MIT) ، 2014 : (أظهرت نسبة مقاومة إلى وزن أكبر بعشر مرات مقارنةً بالفولاذ.
- شبكات بوليمر-سيراميك (Caltech) ، 2021 : (حققت مقاومة ضغط <150 ميغا باسكال عند كثافة >10 ملغ/سم³).

ملاحظة إحصائية: تُظهر مواد الشبكة الدقيقة كفاءة امتصاص للطاقة تتراوح بين 80% و 90%، مقارنةً بنسبة 40% و 60% للرغويات القياسية.

مزايا المواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة وقيودها ومحاور تطويرها المستقبلية.

المزايا.

- خفة الوزن للغاية: أقل من 10 ملغ/سم³.
- مقاومة تحمل عالية: أكثر من 200 ميغا باسكال.
- قابلية إعادة التدوير: بعض الأنواع (مثل الشبكات الدقيقة البوليمرية) قابلة لإعادة التدوير بالكامل.
- العزل الحراري والصوتي: مفيد في مجالي الفضاء والدفاع.

• استعادة بعد التضرر والتشوّه: تُظهر بعض التصميمات استعادة كاملة لشكلها بعد التشوّه

القيود.

- التكلفة: تصل إلى 2000 دولار أمريكي/كغ للنماذج الأولية.

- قابلية التوسع: العديد من التصميمات قابلة للتنفيذ فقط على المقاييس الدقيقة/النانوية.

- القسافة عند الشد: مقاومة ضغط عالية ومقاومة شد منخفضة في بعض الأنواع.

- تعقيد التصنيع: يتطلب أدوات عالية الدقة.

محاور تطوير جديدة للمواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة.

تستكشف التطورات المستقبلية ما يلي:

- **المواد الذكية الهجينة:** دمج أجهزة الاستشعار أو السبائك المتذكّرة للشكل.

- **الشبكات الدقيقة القائمة على المواد الحيوية:** من ألياف السليلوز النانوية أو شبكات الفطريات.

- **المواد المركبة ذاتية الشفاء:** استخدام كبسولات دقيقة تُطلق مادة لاصقة عند الكسر.

- **تكامل المواد الكمومية:** لتحقيق تعدد الوظائف - الخصائص الميكانيكية والإلكترونية.

الاستثمار العالمي: خصصت مبادرة "أفق أوروبا" التابعة للاتحاد الأوروبي ووكالة مشاريع البحوث الدفاعية المتقدمة الأمريكية (DARPA) أكثر من 1,5 مليار دولار

تُعرّف المقاومة النوعية بأنها نسبة مقاومة المادة إلى كثافتها، وهي خاصية أساسية في تطبيقات الفضاء والإنشاءات. تبلغ المقاومة النوعية للفولاذ الكربوني حوالي 65 كيلو نيوتن متر/كغ. وتصل مقاومة سبائك التيتانيوم إلى حوالي 260 كيلو نيوتن متر/كغ. يمكن أن تتجاوز الشبكات النانوية الكربونية المُحسّنة 600 كيلو نيوتن متر/كغ، وفقاً لدراسات حاسوبية تجريبية حديثة.

يكمن الابتكار الرئيسي في استخدام التحسين البايزي، وهو أسلوب تعلّم آلي، لاستكشاف مساحة تصميمية واسعة لهياكل الشبكات ثلاثية الأبعاد القائمة على هياكل نانوية كربونية مُنمّاة بتقنية الترسيب الكيميائي للبخر.

المنهجية والتحسين البايزي.

استخدم فريق البحث من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا ومعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا خوارزمية تحسين بايزية للقيام بشكل متكرر بما يلي:

- ✓ توليد طوبولوجيات شبكية متنوعة لخلية الوحدة.
- ✓ محاكاة الخواص الميكانيكية باستخدام تحليل العناصر المنتهية (FEA).
- ✓ تقييم النتائج باستخدام المقاومة النوعية كدالة مقارنة.
- ✓ حَسّن البحث باستخدام النمذجة الاحتمالية (العمليات الغوسية).

درس الباحثون أكثر من 100,000 تصميم محتمل، وحصروا الخيارات المتاحة إلى أفضل 50 تصميمًا للتصنيع والاختبار. صُنّعت الهياكل باستخدام الطباعة الحجرية ثنائية الفوتون، ثم حُلّت حرارياً إلى كربون زجاجي.

البيانات التجريبية الرئيسية.

أمريكي (2020-2025) للبحث والتطوير في مواد الجيل التالي.

التوقعات المستقبلية للمواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة.

المستقبل واعد:

• صناعة السيارات: يمكن أن يُقلّل وزن المركبات بنسبة 30%، مما يُحسّن الاقتصاد في استهلاك الوقود بنسبة 20-25%.

• صناعة الطيران: تستكشف شركتا بوينغ وإيرباص هذه المواد لألواح المقصورات ودعامات هيكل الطائرة.

• البناء: يمكن للمواد خفيفة الوزن أن تُمكن من بناء هياكل مقاومة للزلازل.

• المنتجات الاستهلاكية: تُعدّ العبوات الواقية والخوذات والأحذية تطبيقات محتملة على المدى القريب.

توقعات السوق: من المتوقع أن ينمو الطلب العالمي على المواد فائقة الخفة وعالية المقاومة بمعدل نمو سنوي مركب نسبته 18%، ليصل إلى 300 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2040.

4.5. مقاومة نوعية فائقة من خلال التحسين البايزي (Baysian) للشبكات الكربونية النانوية.

أحرز تقدّم كبير في علم المواد من خلال التحسين البايزي (Baysian) للشبكات الكربونية النانوية، مما أتاح اكتشاف هياكل ذات مقاومة نوعية فائقة - وهو مقياس حاسم للتطبيقات التي يكون فيها توفير الوزن ضرورياً. يدمج هذا النهج القائم على التحسين الذكاء الاصطناعي والمحاكاة الميكانيكية والتصنيع النانوي لتصميم مواد تتفوق في أدائها على كلّ من المواد الهندسية التقليدية وتصميمات الشبكات النانوية السابقة.

الخلفية والمفهوم.

قيمة الخاصة.

- ✓ الكثافة: 0.85-1.0 ملغم/سم³،
- ✓ مقاومة الضغط: 200-500 ميجا باسكال،
- ✓ المقاومة النوعية: 350-600 كيلو نيوتن/م³/كغ،
- ✓ امتصاص الطاقة: 85-90%،
- ✓ معامل يونغ: حتى 15 جيجا باسكال،
- ✓ حجم السمة الحرجة: 200-500 نانومتر (بنية نانوية)،
- ✓ نسبة التعافي بعد التشوه: <95% لطوبولوجيات مُحسّنة.

النتيجة الملحوظة: أظهرت هندسة "ثمانية-جملون هجين 3" مقاومة أكبر بنحو 2,5 مرة من الشبكات النانوية السابقة القائمة على الجملون عند كثافة مكافئة.

الأهمية والتداعيات

إن الجمع بين المقاومة الجوهرية للكربون، والطوبولوجيا المُحسّنة، والحجم النانوي للهندسة المعمارية يُنتج مادة:

- ✓ أخف من الماء،
- ✓ أقوى من الفولاذ،
- ✓ أكثر كفاءة من معظم الرغويات أو المواد المركّبة المعروفة.

تُتيح هذه التطورات إمكانيات تحوّل نحو ما يلي:

- ✓ المكونات الهيكلية لقطاع الطيران والفضاء،
- ✓ معدات الحماية المُتطورة،
- ✓ الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة (MEMS)،
- ✓ أنظمة النقل الموفرة للطاقة

اقتباس: "تُثبت أن التصميم الهندسي المُوجّه بالذكاء الاصطناعي يُمكن أن يتجاوز الحدس البشري ويُنتج مواد بأداء لم يكن مُتوقعاً من قبل"، تشين وآخرون (2021).

التحديات والتطوير المُستقبلي.

على الرغم من الخصائص الرائعة، لا تزال هناك العديد من التحديات:

✓ قابلية التوسّع في التصنيع: الطرق الحالية، مثل الطباعة الحجرية ثنائية الفوتون، بطيئة ومُكلفة.

✓ تحويل المواد: يُمكن أن يُسبب التحلل الحراري انكماشاً أو تشوهاً في الأشكال الهندسية المُعقّدة.

✓ الاستقرار البيئي: تتحلّل بعض البنى النانوية الكربونية تحت الأكسدة أو التعرض للأشعة فوق البنفسجية.

تشمل التوجهات المستقبلية ما يلي:

- ✓ الطباعة ثلاثية الأبعاد النانوية المتوازية،
- ✓ نماذج التعلم الآلي الهجينة لتحسين الفوري،
- ✓ مواد خام بديلة (مثل ألياف السليلوز النانوية، ونيتريد البورون)

التوقعات الاقتصادية.

(PAMs). تتميز هذه المواد بخصائص بنيوية وميكانيكية فريدة، مما يفتح آفاقاً جديدة في علم المواد وهندستها.

المواد الهندسية متعددة الخيوط هي بُنى ثلاثية الأبعاد تتألف من جزيئات مترابطة، مثل الحلقات أو الأقفاص، تشكل شبكات متماسكة. على عكس المواد التقليدية التي تعتمد فقط على التركيب الكيميائي، تستمد المواد الهندسية متعددة الخيوط خصائصها من التنظيم الهندسي لعناصرها الداخلية. يضيف هذا التصميم سلوكيات شبيهة بالجسم الصلب وبالسائل، وهي ثنائية لا تُلاحظ في المواد التقليدية.



الوحدات الأساسية للمواد الهندسية متعددة الخيوط: حلقات منفصلة أو جزيئات تشبه القفص مترابطة بطريقة متعددة الخيوط، تشبه درع الزرد (السلاسل).

1.6. الوحدات البنيوية والترابط في المواد الهندسية متعددة الخيوط وخصائصها وتطبيقاتها.

الوحدات الأساسية للمواد الهندسية متعددة الخيوط هي حلقات منفصلة أو جزيئات تشبه القفص مترابطة بطريقة متعددة الخيوط، تشبه درع الزرد (السلاسل). توفر هذه الترابطات المرونة والقدرة على الصمود، مما يسمح للمادة بالاستجابة ديناميكياً للقوى الخارجية. إن الترابط بين هذه الوحدات ميكانيكي وليس كيميائياً، مما يمنح

✓ تكلفة الغرام الواحد من الشبكات النانوية الكربونية المُحسَّنة: 500-1500 دولار أمريكي (على نطاق المختبر)،

✓ التكلفة الصناعية المتوقعة بحلول عام 2030 (مع التوسع): أقل من 50 دولاراً أمريكياً للغرام،

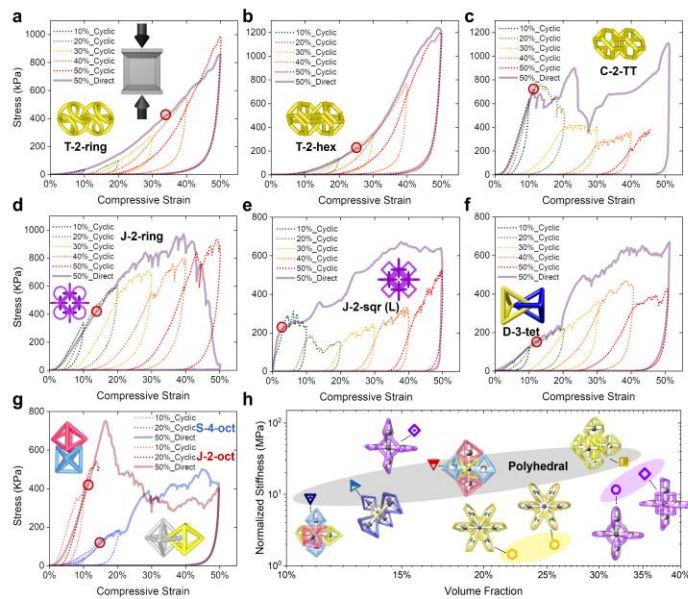
✓ يُقلِّل التصميم المُوجَّه بالذكاء الاصطناعي من وقت التجربة والخطأ بنسبة 90%، مما قد يوفر ملايين الدولارات في البحث والتطوير لكل تطبيق رئيسي للمواد.

التوقعات: من المتوقع أن ينمو سوق المواد الفائقة المُحسَّنة بالذكاء الاصطناعي بمعدل نمو سنوي مُركَّب قدره 28%، ليصل إلى 75 مليار دولار أمريكي بحلول عام.

6. المواد الهندسية متعددة الخيوط (polycatenated architected materials) - التصميم الميكروي للمواد.

تعريف المواد الهندسية متعددة الخيوط.

منذ نشأته في منتصف القرن العشرين، اعتمد علم المواد على رباعية البنية والخصائص والسلوك وتكنولوجيا التصنيع، كما ركَّز على دور البنية المجهرية في تفسير خصائص المواد وفهم سلوكها. وفي هذا السياق، يأتي تطوير المواد الهندسية متعددة الخيوط ترجمة لأساسيات علم المواد. ففي تقدم رائد، قدم العلماء فئة جديدة من المواد المعروفة باسم المواد الهندسية متعددة الخيوط (السلاسل) (polycatenated architected materials)



الجسيمات الفردية درجة من الحرية الحركية مع الحفاظ على سلامة البنية بشكل عام.

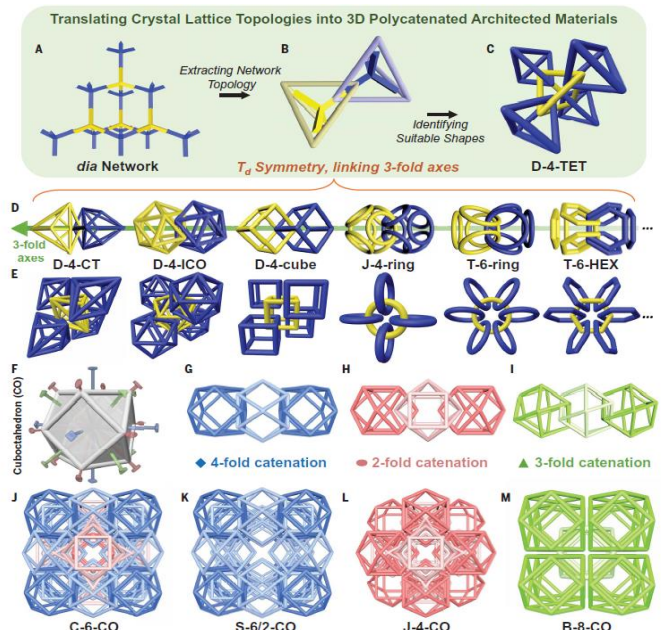


Fig. 1. Design strategy for PAMs. (A to E) A typical design workflow of PAMs from octahedrally arranged six-ring clusters (J-4-ring), tetrahedrally arranged four-ring

بعض طرائق الترابط بين الوحدات البنوية في المواد الهندسية متعددة الخيوط.

السلوك الميكانيكي الفريد للمواد الهندسية متعددة الخيوط من خلال شكل منحنيات الإجهاد- تشوه في اختبارات ضغط.

2.6. البنية المجهرية في المواد الهندسية متعددة الخيوط وطرائق تحضيرها وتطبيقاتها المتوقعة.

على المستوى المجهرى، تتكون المواد الهندسية متعددة الخيوط PAMs من جزيئات مُجمّعة في الاتجاهات ثلاثية الأبعاد، وتشكل شبكات متشابكة. يسمح هذا الهيكل بالتوازن بين التماسك والمرونة، مما يُمكن المادة من تكييف شكلها وخصائصها الميكانيكية استجابةً للمحفزات الخارجية. تضمن الطبيعة المتشابكة للجسيمات أن المادة تحافظ على سلامتها حتى في ظل التشوه الكبير. طرائق التحضير.

يتضمن تصنيع المواد الهندسية متعددة الخيوط انتقال الشبكات البلورية الاعباطية إلى مجموعات جسيمات متصلة. تتضمن هذه العملية تصميم هندسة الجسيمات الفردية وترابطاتها لتحقيق الخصائص الميكانيكية المطلوبة. يتم استخدام تقنيات التصنيع

الخصائص والتطبيقات.

تظهر المواد الهندسية متعددة الخيوط PAMs استجابات ميكانيكية فريدة بسبب تصميمها الهندسي. تحت الأحمال الخارجية الصغيرة، تتصرف مثل السوائل غير النيوتونية، حيث تُبدي خصائص القص والترقق والتكثيف. عند الإجهادات الأكبر، تنتقل إلى سلوك يشبه الجسم الصلب مع علاقات إجهاد-تشوه غير خطية. هذا التنوع يجعل هذه المواد مناسبة للتطبيقات التي تتطلب امتصاص الطاقة، مثل معدات الحماية أو المواد المقاومة للصدمات. بالإضافة إلى ذلك، فإن قدرتها على تغيير الشكل استجابةً للشحنات الكهروستاتيكية على النطاق المجهرى تشير إلى إمكانات في تطوير أنظمة تستجيب للمحفزات والهياكل المتغيرة.

المتقدمة، مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد والتجميع على نطاق النانو، لبناء هذه الهياكل المعقدة بدقة عالية.

على نطاق المختبر، يتم إنتاج PAMs عادةً باستخدام تقنيات التصنيع الإضافي عالية الدقة، مثل البلمرة ثنائية الفوتون والطباعة باستعمال شعاع الإلكترون. تسمح هذه الأساليب للباحثين بإنشاء نماذج أولية صغيرة الحجم بتكوينات هيكلية دقيقة، مما يتيح دراسة سلوكها وخصائصها الميكانيكية.

بالنسبة للإنتاج على نطاق صناعي، يتم استكشاف التطورات في طرق التصنيع القابلة للتطوير، بما في ذلك القولبة بالحقن، والمعالجة من لفة إلى لفة، والطباعة ثلاثية الأبعاد عالية الإنتاجية. تهدف هذه التقنيات إلى خفض تكاليف الإنتاج مع الحفاظ على البنية المعقدة للمواد الهندسية المتعددة الخيوط PAMs. ومن المتوقع أن تتحسن الجدوى الصناعية لـ PAMs مع المزيد من البحث في تركيب المواد وأتمتة التجميع، مما يمهّد الطريق للتصنيع على نطاق واسع والتطبيقات التجارية.

التطبيقات المتوقعة.

إن الخصائص الفريدة للمواد الهندسية المتعددة الخيوط PAMs تضعها في مجموعة واسعة من التطبيقات. تجعلها قدراتها على امتصاص الطاقة مثالية لمعدات الحماية وأنظمة تخفيف التأثير. يمكن أن تؤدي طبيعة PAMs المستجيبة للمحفّزات إلى ابتكارات في مجال الروبوتات الناعمة، حيث تحتاج المواد إلى تكييف شكلها وصلابتها ديناميكياً. علاوة على ذلك، تشير قابلية التوسع وخصائصها القابلة للضبط إلى استخدامات محتملة في مجال الفضاء والأجهزة الطبية الحيوية والإلكترونيات المرنة.

7. مستقبل البحث والتطبيقات في علم المواد الهندسية.

منذ فجر التاريخ، وحتى المستقبل المنظور، تحيط المواد الهندسية بالعنصر البشري في كل مكان، من الملابس إلى المأكل، وحتى المأوى والتنقل والاتصالات والصحة. إنها تُشكّل أساس الكون، ولا غرابة بعد كل تلك التطورات العلمية والتقنية العميقة في ظهور علم المواد الذي انتشر خلال الربع الأخير من القرن العشرين في معظم الجامعات والمعاهد العليا على مستوى العالم من خلال تأسيس أقسام جامعية في علم المواد، وافتتاح درجات علمية هندسية وعليا، ومن خلال ارتقاء قضايا المواد، واستخراجها، وتدقيقها، واستعمالها، وانعكاساتها على البيئة والمجتمع إلى مصاف السياسات الاقتصادية والصناعية الحكومية والدولية. ويلعب التعليم والتأهيل والتدريب في مجالات علم المواد وتطبيقاتها دوراً محورياً في تأهيل الأطر المناسبة، والتواصل، ودقة التعبير، ونشر المعرفة والخبرة بين الأطراف المجتمعية المعنية بإنتاج المواد الهندسية، وتطبيقاتها، ورسم السياسات الرشيدة ذات الصلة.

تعالج الإمكانيات التحويلية لتكنولوجيا النانو بعض التحديات الأكثر إلحاحاً في العصر الحديث، من الرعاية الصحية إلى الاستدامة البيئية. وبينما يستمر المجال في التطور، فإنه يواجه تحديات تعريفية وتنظيمية وأخلاقية. ومع ذلك، ومع النمو القوي للسوق والإنجازات الرائدة، تستعد تكنولوجيا النانو للعب دور محوري في تشكيل مستقبل العلوم والتكنولوجيا والمجتمع. يُمثل تطوير مواد خفيفة كالبوليسترين وممتينة كالفلوآز الكربوني فصلاً فارقاً في علم المواد. فهو يجمع بين تكنولوجيا النانو والمحاكاة الحيوية والتصنيع الرقمي لحل مفارقات هندسية قديمة. ورغم استمرار التحديات المتعلقة بالتكلفة وقابلية التوسع، إلا أن الطريق إلى الأمام واعدٌ للغاية - من وسائل نقل

- Diran Apelian, looking beyond the last 50 years: the Future of Materials science and engineering, JOM • February (2007), 65–73.
- J.O. Cross, R.L. Opila, I.W. Boyd, and E.N. Kaufmann, Materials characterization and the evolution of materials, M R S B U L L E T I N • VOLUME 40 • DECEMBER 2015, 1019– 1033.
- Craig J. Donahue, J. Chem. Educ. 2019, 96, 2682–2688.
- Claes Fredriksson, Innovative Software for Integrating Materials and Manufacturing Education, American Society for Engineering Education, (2021), ASEE Annual conference, July 26–29, Paper ID #33486.
- T A Schaedler et al, Ultralight Metallic Microlattices, Science, 2011, 334, 962,
- P. Serles, J. Yeo, M. Haché, P. G. Demingos, J. Kong, P. Kiefer, S. Dhulipala, B. Kumral, K. Jia, S. Yang, T. Feng, C. Jia, P. M. Ajayan, C. M. Portela, M. Wegener, J. Howe, C. V. Singh, Y. Zou, S. Ryu, and T. Filleter, Ultrahigh Specific Strength by Bayesian Optimization of Carbon Nanolattices, Adv. Mater., 2025, 37, 2410651, p1– 11.
- Zhou et al., 3D polycatenated architected materials, Science, (2025), 387, p269–277.

صديقة للبيئة إلى بنية تحتية متينة. ومع انتقال هذه المواد من المختبر إلى أرض المصنع، فإنها قد تُعيد تعريف ليس فقط كيفية البناء، بل أيضاً كيفية معيشة الإنسان.

من المتوقع أن يركز مستقبل البحث في المواد الهندسية المتعددة الخيوط على تحسين تقنيات التصنيع، وتحسين أداء المواد، وتوسيع نطاق تطبيقاتها. وسوف تُسهّل التطورات في تكنولوجيا النانو والنمذجة الحاسوبية تصميم المواد الهندسية المتعددة الخيوط باستجابات ميكانيكية دقيقة مصممة لصناعات محددة. ومن المرجح أيضاً أن يستكشف البحث المواد الهجينة التي تجمع بين هياكل المواد الهندسية المتعددة الخيوط والبوليمرات والمعادن المتقدمة لتحقيق متانة وقابلية للتكيف غير مسبوقة. ومن المتوقع اقتصادياً أن ينمو سوق المواد الهندسية بشكل كبير، مدفوعاً بالطلب المتزايد في قطاعات الطيران والدفاع والطب. وتشير تقارير الصناعة إلى أن السوق العالمية للمواد المتقدمة قد تتجاوز 200 مليار دولار بحلول عام 2030، حيث تلعب المواد الهندسية المتعددة الخيوط دوراً حاسماً في حلول الهندسة من الجيل التالي.

مراجع للاستزادة.

- الرمل والسيليكون: علم غير العالم، دنيس ماكوان، ترجمة رفيع جبره، المنظمة العربية للترجمة- لبنان.
- Satya Prakash Pandey, Vishwajeet Singh, The Importance of Engineering Materials in Present World, International Journal of Science and Research (IJSR), (2015), Volume 6 Issue 3, March 2017, 433– 441.