التكامل البُعدي وتعزيز الثورة الصناعية الرابعة عبر تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد

إبراهيم المجدوب*[1]، عبد السلام علي أحمد [2]، حسين يونس السبيعي [3]
[1] قسم الهندسة الصناعية والإنتاج، الأكاديمية الليبية فرع بني وليد، بني وليد، ليبيا
[2] قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، جامعة بني وليد، بني وليد، ليبيا
[3] كلية الطيران المدني والأرصاد الجوية، ليبيا
* **البريد الإلكتروني (للباحث المرجعي):** abra.almajdoub@gmail.com

Dimensional Integration and Enhancing the Fourth Industrial Revolution through 3D Printing and 4D Printing Technology

Abraheem Almajdoub *[1], Abdussalam Ali Ahmed [2], HusinY. ASubie [3]
[1] Department of Industrial and Production Engineering, Libyan Academy Bani Walid Branch, Bani Walid, Libya
[2] Mechanical and Industrial Engineering Department, Bani Waleed University, Bani Walid, Libya
[3] College of Civil Aviation and Meteorology, Libya

Received: 02-03-2024; Accepted: 22-06-2024; Published: 17-07-2024

الملخص

تستعرض الورقة البحثية موضوع التكامل البُعدي وأثره في تعزيز الثورة الصناعية الرابعة، مُسلِّطةً الضوء على تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد كعناصر فاعلة في هذا التحول، ويُظهر البحث التطور التاريخي والتقني والأهمية المتزايدة لهذه التقنيات ودورها البارز في إحداث نقلة نوعية في مجالات الصناعة والابتكار، حيث يُمكن للطباعة ثلاثية الأبعاد إنتاج مكونات معقدة بكفاءة ودقة عالية وبتكاليف منخفضة، في حين تُضيف الطباعة رباعية الأبعاد بُعداً جديداً يتيح للمواد المطبوعة التفاعل مع البيئة المحيطة وتغيير خصائصها استجابةً لمحفزات معينة.

يُشير البحث إلى أن هذا التكامل البُعدي يُعد خطوة مهمة نحو تحقيق تحسينات كبيرة في الصناعات المختلفة، كما يُناقش أيضاً التحديات التي قد تواجه هذه التقنيات، كونها تكنولوجيا ناشئة لا تزال في مراحل البحث والتطوير، مع الحاجة لمواد خاصة يمكن برمجتها، وتعقيد التصميم، والتحكم الدقيق في العملية.

تُلقي الورقة الضوء على الأثر الاقتصادي والبيئي لتقنيات الطباعة المتقدمة، مُشيرةً إلى أهمية البحث في تطبيقاتها المستدامة، مُقدمةً نظرة مستقبلية للإمكانيات الواعدة التي يُمكن أن تُعزز التنافسية وتُحقق التطور في مجالات الصناعة والتصميم.

الكلمات المفتاحية: التكامل البُعدي، الثورة الصناعية 4.0، تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Printing)، تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد (4D Printing)، الابتكار الصناعي.

Abstract:

The research paper reviews the topic of dimensional integration and its impact on enhancing the Fourth Industrial Revolution, highlighting 3D printing and 4D printing technologies as active elements in this transformation. The research shows the historical and technical evolution and the increasing importance of these technologies and their prominent role in bringing about a qualitative leap in the fields of industry and innovation. 3D printing can produce complex components efficiently, accurately, and at low cost, while 4D printing adds a new dimension that allows printed materials to interact with the surrounding environment and change their properties in response to certain stimuli.

The research indicates that this dimensional integration is an important step towards significantly improving various industries. It also discusses the challenges these technologies may face, as they are emerging technologies still in the stages of research and development, with the need for programmable special materials, design complexity, and precise process control.
The paper sheds light on the economic and environmental impact of advanced printing technologies, pointing to the importance of research in their sustainable applications, and offering a future outlook for the promising possibilities that can enhance competitiveness and achieve progress in industry and design.

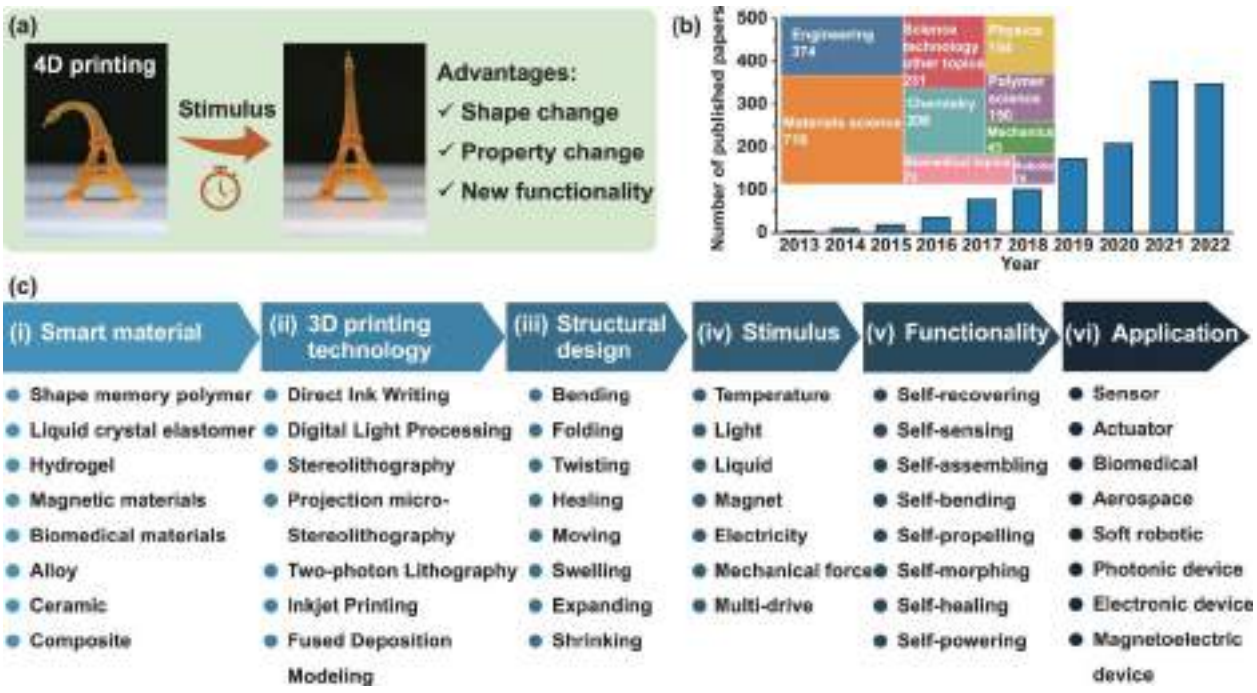
Keywords: Dimensional Integration, Industrial Revolution 4.0, 3D Printing Technology, 4D Printing Technology, Industrial Innovation.

1. المقدمة:

في عصر التكنولوجيا الحديث، لا شك أن التطورات في مجال التصنيع والتكنولوجيا لها تأثير كبير على العالم الصناعي والمجتمع بشكل عام، ومن بين هذه التطورات يبرز بوضوح تكامل الأبعاد كمفهوم رئيسي في تحول الصناعة، وهو ما يعني الدمج المتقدم والفعال بين الأبعاد الثلاثة مع الزمن كبعد رابع، فالطباعة ثلاثية الأبعاد3 D Printing تقنية تصنيع إضافي تستخدم لإنشاء أجسام معقدة بتراكم طبقات متتالية من المواد، أما الطباعة رباعية الأبعاد4 D Printing فهي توسُّع في الطباعة ثلاثية الأبعاد يضيف البُعد الزمني، مما يسمح للمواد بتغيير شكلها أو خصائصها .[3] [5]

يُعد التكامل البعدي في الطباعة رباعية الأبعاد تطوراً متقدماً في مجال الطباعة ثلاثية الأبعاد، حيث يتم دمج المواد الذكية والتصميم الهيكلي لتمكين الهياكل المطبوعة من تغيير شكلها ديناميكياً مع مرور الوقت، هذه التقنية تفتح آفاقًا جديدة للإبتكار في الثورة الصناعية الرابعة من خلال توفير وظائف قابلة للتخصيص وتطبيقات متعددة التخصصات، حيث تمنح الطباعة رباعية الأبعاد الهياكل ثلاثية الأبعاد وظائف فريدة، مما يجعلها مثالية للإستخدام في مجالات متنوعة مثل: الهندسة، علوم المواد، الكيمياء، الفيزياء، الطب الحيوي، الروبوتات، والبصريات، وغيرها، بإمكانات واسعة تعمل على تحسين الكفاءة وإنشاء حلول مبتكرة للتحديات الهندسية والطبية، حيث يمكن للمواد أن تتكيّف وتتغيّر بشكل ذاتي استجابةً للمحفزات الخارجية.[1] [8]

بدأت الثورة الصناعية الرابعة في أوائل القرن الحادي والعشرين، وتسعى إلى دمج التكنولوجيا الرقمية والذكاء الإصطناعي وتحليل البيانات والطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد لتحقيق تصنيع أكثر ذكاءً وفعاليّة ومرونة، وتعتبر تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد من أهم التقنيات التي تُسهم في تحقيق هذا التكامل البُعدي، بفضل قدرتها على إنشاء هياكل ثلاثية الأبعاد من خلال تراكم الطبقات، حيث يمكن لهذه التقنيات إنتاج منتجات معقدة ومخصصة بشكل أسرع وبتكلفة أقل مقارنةً بالطرق التقليدية للتصنيع، فالتكامل البعدي يتيح الفرصة للمصنعين والمهندسين للتفاعل مع المواد والهياكل عبر الزمن والتحكم فيها بطرق جديدة ومبتكرة، بتصميم أجسام ثلاثية الأبعاد تستجيب بشكل تلقائي للمتغيرات البيئية أو الظروف الخارجية، مما يفتح الباب أمام تطبيقات مثيرة للدهشة في مجالات متعددة، كما تعتبر هذه التقنيات محورية في تحقيق أهداف الإستدامة وحماية البيئة، حيث يمكن استخدام مواد قابلة للتحلل وإعادة التدوير في عمليات الطباعة، وبالتالي تقليل النفايات والتأثيرات البيئية السلبية، وبالنظر إلى هذه الجوانب، يمكن القول إن التكامل البعدي وتعزيز الثورة الصناعية الرابعة من خلال تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد يمثل تحولاً ثورياً في عالم التصنيع والتكنولوجيا، مما يعزز الإبتكار والتطور الإقتصادي والإجتماعي بشكل عام.[3] [6]



الشكل 1 العملية العامة والإعتبارات التقنية الرئيسية لإتجاه التطوير والخصائص متعددة التخصصات للطباعة D4[1].

حيث يوضح الشكل 1:

a) مفهوم الطباعة D4، مع عرض مُحفّز يؤدي إلى تغييرات في الشكل والخصائص والوظائف في الكائن المطبوع.

b) رسم بياني يعرض عدد الأوراق المنشورة حول مواضيع مختلفة متعلقة بالطباعة D4من 2013 إلى 2022.

c) مقسم إلى ستة أجزاء:

i. يسرد أنواع المواد الذكية المستخدمة في الطباعة D4مثل: البوليمر ذو الذاكرة الشكلية، والإيلاستومر البلوري السائل، والهيدروجيل.

ii. يصف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد المختلفة بما في ذلك الكتابة المباشرة بالحبر والتصوير الضوئي الرقمي وغيرها.

iii. يعدد ميزات التصميم الهيكلي مثل: الإنحناء والطي واللف التي يمكن تحقيقها بهذه التقنية.

iv. يذكر محفزات مختلفة مثل: درجة الحرارة والضوء والمائع، التي يمكن أن تحدث تغييرات في الكائنات المطبوعة.

v. يسرد وظائف مثل: الإسترداد الذاتي والإستشعار الذاتي التي تتميز بها الكائنات المصنوعة من خلال هذه التقنية.

vi. يستشهد بتطبيقات في مجالات مثل: الحساسات والمحركات والأجهزة الطبية وغيرها، حيث تجد هذه الكائنات المطبوعة استخداماً.

وعلى الرغم من التقدم الكبير، لا تزال هناك حاجة إلى فهم أعمق للعلاقة بين المواد، التصميم، والوظيفة لتحقيق الإمكانات الكاملة للطباعة D4، ويُعد التصميم العقلاني للهياكل المطبوعة D4 واختيار المحفزات المناسبة عناصر حاسمة لتوسيع نطاق التطبيقات. مشكلة البحث تتمحور حول إمكانية استخدام تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد لتحقيق

التكامل البعدي بشكل فعال، وكيف يمكن لتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد أن تُسهم في تعزيز الثورة الصناعية الرابعة؟ وما هي التحديات التي قد تواجه تطبيق هذه التقنيات، وكيف يمكن التغلب عليها؟

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل دور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد في تحقيق التكامل البعدي، وتأثيرات التقنيات على الإنتاجية والجودة والإستدامة في الصناعات المختلفة، وتفترض أنه يمكن لتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد أن تسهم في تحقيق التكامل البعدي وتعزيز الثورة الصناعية الرابعة.

2. التطور التاريخي والتقني للطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد:

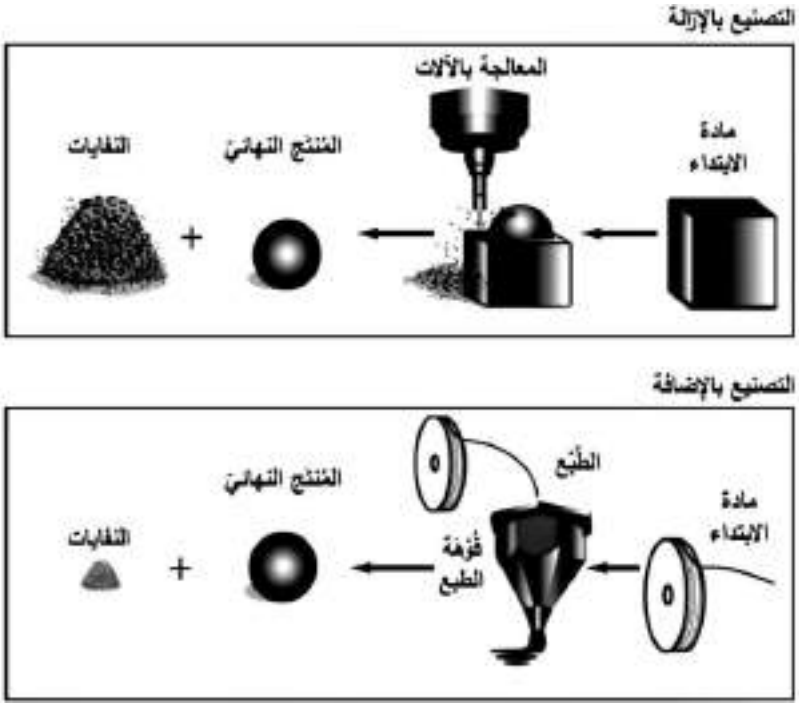
تؤكد الدراسات السابقة أن الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد لعبت دوراً محورياً في الثورة الصناعية الرابعة، مما أدى إلى تحولات جذرية في العديد من القطاعات، فهذه التقنيات لم تعد مقتصرة على النماذج الأولية فحسب، بل أصبحت جزءاً من الإنتاج الكمي والتصنيع المخصص، ففي أواخر عام 1980 ظهر المبدأ الأول للطباعة ثلاثية الأبعاد والتي سميت حينها بتقنية النماذج الأولية السريعة Rapid Prototyping، حيث حاول د. كوداما في اليابان تسجيل براءة اختراع لوسيلة يمكن من خلالها تصنيع النماذج الأولية للمجسمات الكبرى بصورة أسهل وأسرع، وقد فشل د. كوداما في إتمام تسجيل اختراعه لعجزه عن توفير كافة البيانات المطلوبة قبل الفترة المحددة، وهو ما أتاح الفرصة عام 1986 للمخترع "تشارلز هال" لتسجيل براءة اختراعه التي حملت اسم "جهاز التجسيم" Stereolithography Apparatus، وهو اسم الآلة التي اخترعها عام 1983 وانطلق منها لتأسيس شركة 3D Systems Corporation، والتي لا تزال تعد واحدة من أهم شركات الطباعة ثلاثية الأبعاد حتى يومنا هذا. في عام 1987 كشفت شركة 3D Systems عن SLA-1 وهي أول نسخة تجارية عرفها العالم للطابعة ثلاثية الأبعاد، وهو العام نفسه الذي شهد تسجيل الباحث الأمريكي "كارل ديكارد" لبراءة اختراع "التلبيد عبر الليزر الإنتقائي" Selective Laser Sintering، وأسس أول الشركات المنافسة في هذا المجال، قبل أن تقوم الشركة الأولى بالإستحواذ عليها عام 1989، وهو أيضاً العام الذي شهد ظهور شركة Stratasys المالكة لبراءة اختراع FDM اختصاراً لمصطلح Fused Deposition Modelling أي "النمذجة عبر الترسيب والصهر"، إذاً، فإن حقبة الثمانينيّات من القرن الماضي بداية انطلاق تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، ومنه مرت هذه التقنية بتطورات كبيرة خلال العقد الأخير من القرن ذاته والعقد الأول من الألفية الجديدة، وقد ركز هذا التطور في بدايته على الأغراض الصناعية، حيث توالت براءات الإختراع التي تضيف طرق وأساليب جديدة لاستخدام النماذج المصممة رقميّاً في إنتاج وتصنيع مجسمات أولية، وقد اتَّسمت الطابعات ثلاثية الأبعاد حينها بارتفاع أسعارها الملحوظ حتى أطلقت شركة3 D Systems عام 2007 أول طابعة ثلاثية الأبعاد متكاملة بسعر يقل عن 10 آلاف دولار، وفي عام 2009 شهد العالم الكشف عن طابعة BfB RapMan وهي الطابعة التي جعلت الطباعة ثلاثية الأبعاد أكثر سهولةً وتداولًا، وأسست للطابعات التي نراها اليوم في الأسواق والمستخدمة في عدة مجالات مختلفة.[4] [7]

الشكل 2 رسم توضيحي يشرح مراحل تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.[3]

تعمل الطابعات ثلاثية الأبعاد في بادئ الأمر على الرسومات الرقمية التي يرسمها مهندس التصميم أو مهندس الميكانيك أو غيرهما من المختصين في التصميم باستخدام الحاسوب (CAD)، وثمّة عدة تطبيقات تلبي كافة الأدوات اللازمة للمهندس

مثل: "Creo" ,"SolidWorks" ,"CATIA"وغيرها من البرمجيات التجارية، وبعد تصميم القطعة أو العيّنة المطلوبة، يحفظ الملف بصيغة (STL)أو (OBJ)، وهي الصيغ التي تتعامل معها الطابعات ثلاثية الأبعاد، وتدخل ضمن تقنية (Stereolithography)، ثمّ تُمد الطابعات بالمادة المطلوبة أو المُراد استخدامها في تكوين المنتج، وهي أشبه بالحبر الذي يُستخدم في الطابعات التقليدية، وتكون هذه المواد على هيئة خيوط ممتدة إلى الطابعة تُعرف بعملية "التصنيع بالخيوط المنصهرة" ،(Fused Filament Fabrication) لتعمل الطابعة على إذابة الخيوط، وعادة ما تكون المواد المستخدمة "لدائن حرارية" أو بتعبير آخر "بوليمرات بلاستيكية"، وهي تلين بالحرارة وتتصلّب مرة أخرى عند التبريد، وأما المواد المعدنية الصلبة كالسبائك وغيرها، فإن عملية استخدامها تُعد أصعب، لذا يلجأ المصنعون إلى صناعة قوالب بمواد تتحمل الحرارة. [3]

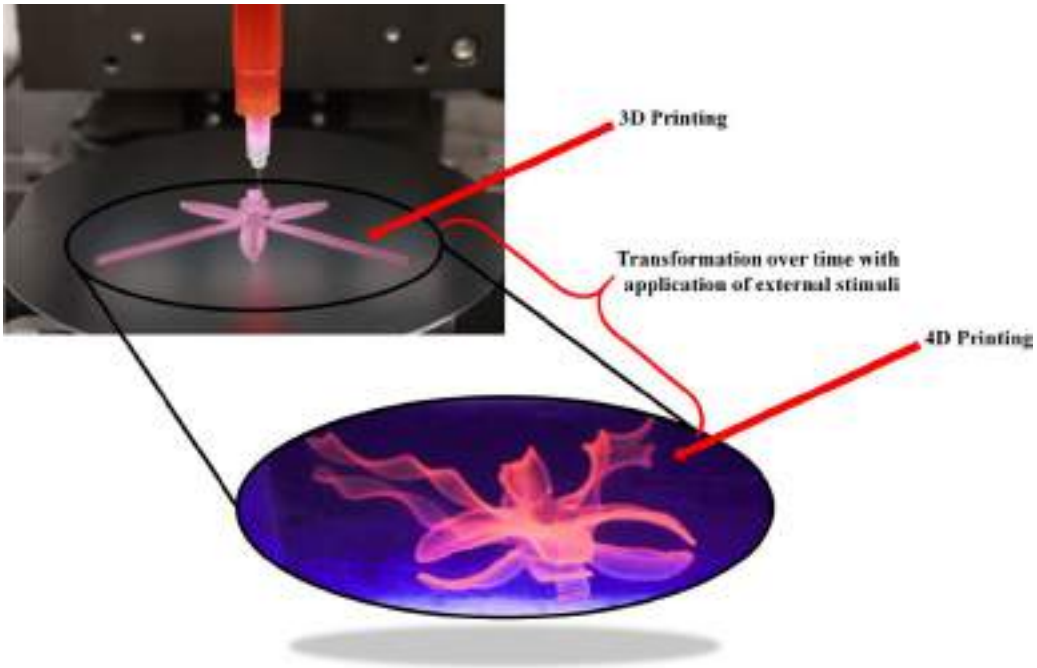
تعتمد الطابعة ثلاثية الأبعاد على عملية التصنيع التراكمي (Additive Manufacturing)، وهي عملية بناء تدريجية أفقية، إذ تنصَبُّ طبقات ثنائية الأبعاد فوق بعضها إلى أن يكتمل المنتج، وذلك عكس ما نعتاده عن آلات التصنيع التقليدية التي تعتمد على قص ونحت المواد الخام، للحصول على المجسم النهائي، فتبذر ما يصل إلى 90% من المواد المستخدمة.[7]



الشكل 3 آلية التصنيع بالإضافة والتصنيع بالإزالة.[3]

الطابعات ثلاثية الأبعاد، تضمن كفاءة عالية في مبدأ استهلاك المواد، فلن يكون هناك أيّ زوائد غير مستخدمة، فضلاً عن الدقة المتناهية في الحصول على أكثر التفاصيل الهندسية تعقيداً، بفضل ميزة البناء أو التصنيع التراكمي، ومع كل الإيجابيات التي يوفرها التصنيع ثلاثي الأبعاد، فإن ثمة عيوباً ينبغي أن تُوضع في الحسبان، فمنذ أن امتهن الإنسان صناعة الحديد واستخدمه في عدّة ميادين على مدار عدّة قرون، أدرك منذ البداية إمكانية تقوية الحديد وجعله أكثر صلابة، وكيفية فعل ذلك بواسطة تعريضه للحرارة والتبريد، وفق معالجة معيّنة تعرف بعملية صقل المعادن، لقد لازمت هذه المهارات الإنسان، وما زال ملتزما بها حتى اليوم في إنتاج عدد من المواد الصلبة بواسطة الإنتاج الضخم، لكن هذا ما قد تفقده الطباعة ثلاثية الأبعاد، صلابة المنتج، وعندما تفقد المواد الصلابة اللازمة فإنها تتعرض إلى "الكلال" أو "الإجهاد"، وهو مصطلح ميكانيكي يُستخدم لوصف نوع من أنواع التشوّه البنيوي للمادة عند تعرضها لحمل دوري، لذا يُستعان بمعالجات ما بعد التصنيع للتخلص من العيوب الميكانيكية، مثل: استخدام تقنية الضغط المتوازن عالي الحرارة (Hot Isostatic Pressing)، وهي طريقة لتعريض المنتج لحرارة وضغط عاليين من جميع الأطراف، لجعله أكثر صلابة، ورغم تلك التحديات الميكانيكية فإنّ التصنيع بواسطة

الطابعات ثلاثية الأبعاد قد قطع شوطاً كبيراً في عدة مجالات، ففي منتصف العام 2021، خرجت شركة EOS الرائدة في مجال الطباعة ثلاثية الأبعاد على مستوى العالم، بإعلانها عن صناعة أوّل محرك صاروخي بشكل كامل بواسطة هذه التقنية الحديثة في مفاجأة هي الأثقل من نوعها، ولأن التطور لم ينتهي، فإن الطباعة رباعية الأبعاد جاءت بمواد تتطور بمرور الوقت، وهذا يعني أننا نواجه ليس فقط عالماً نشطاً ومزدهراً للغاية، ولكن أيضاً عالماً معقّداً يتطلب مهارات عديدة في الفيزياء والهندسة وكيمياء المواد والميكانيكا بنهج متعدد التخصصات ومتقارب لتطوير أصل الأفكار في هذه التكنولوجيا الصناعية الحديثة، وترتبط هذه التكنولوجيا ارتباطاً وثيقاً بوجود سوق اقتصادي فعّال وهو سوق مهم ينبع من البحث التكنولوجي في العلوم الهندسية المرتبطة إلى أحد المكوّنات الأساسية وهو المكوّن الخاص بالمواد، للتلاعب بها وإعدادها للتصنيع، ومع مجهودات الخبراء والعلماء والبحاث يتم اكتشاف تطبيقات جديدة ومواد جديدة وطابعات ثلاثية الأبعاد جديدة، فهي تقنية متقدمة تتطور باستمرار، وتتيح للمواد المطبوعة تغيير شكلها بمرور الوقت أو تحت تأثير العوامل الخارجية مثل: الماء والحرارة والضوء، وتتغير بناءً على البعد الرابع وهو الوقت.[3] [13]

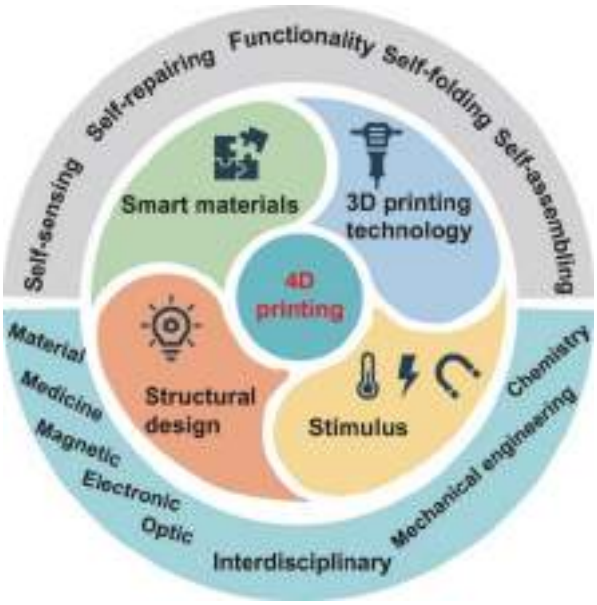


الشكل 4 تطور الطباعة من D3 إلى[13].D4

يُظهر الشكل 4 مقارنة بين الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد، حيث يتحول الكائن المطبوع الذي يشبه "نجم البحر" بمرور الوقت وبتأثير محفزات خارجية كالضوء فوق البنفسجي، مما يدل على الخصائص الديناميكية للطباعة رباعية الأبعاد.

هذه التقنية قد تساعد في بناء الجسور أو الملاجئ أو أي نوع من المنشآت التي يمكنها بناء أنفسها أو إصلاح أنفسها في حالة حدوث أضرار بسبب الطقس، كما أن الباحثون في معهد ماساتشوستس التقني وشركات مثل "إيرباص" يعملون على تطوير واستغلال هذه التقنية في مجالات مثل: الفضاء والطيران، حيث تتطلب الطباعة رباعية الأبعاد مزيدا من البحث والتطوير، ويتمثل التحدي الرئيسي لها في التصميم الهيكلي الذي يشمل كلاً من قسم الأجهزة وقسم البرمجيات، رغم مرور عدة سنوات منذ عام 2013، ومع ذلك فهي ليست متاحة للجميع بعد، وتتوقع الدراسات أن تساهم في جعل حياتنا أفضل وأكثر ذكاءً.[9] [11]

في الوقت الحاضر، ركزت معظم الدراسات على القدرة على تغيير حجم الهياكل المطبوعة D4، بما في ذلك الإنحناء واللف والإنكماش بطول العمر حيث يمكن برمجة هذه السلوكيات بشكل أكبر لإنشاء خزانات ورافعات وأنابيب دقيقة وروبوتات وحتى ألعاب هيكلية مطبوعة رباعي الأبعاد، لتغيير الحجم الإتجاهي الذي سيتم تكوين المادة فيه.[10] [12]



الشكل 5 نظرة عامة لتكنولوجيا الطباعة المتقدمة.[1]

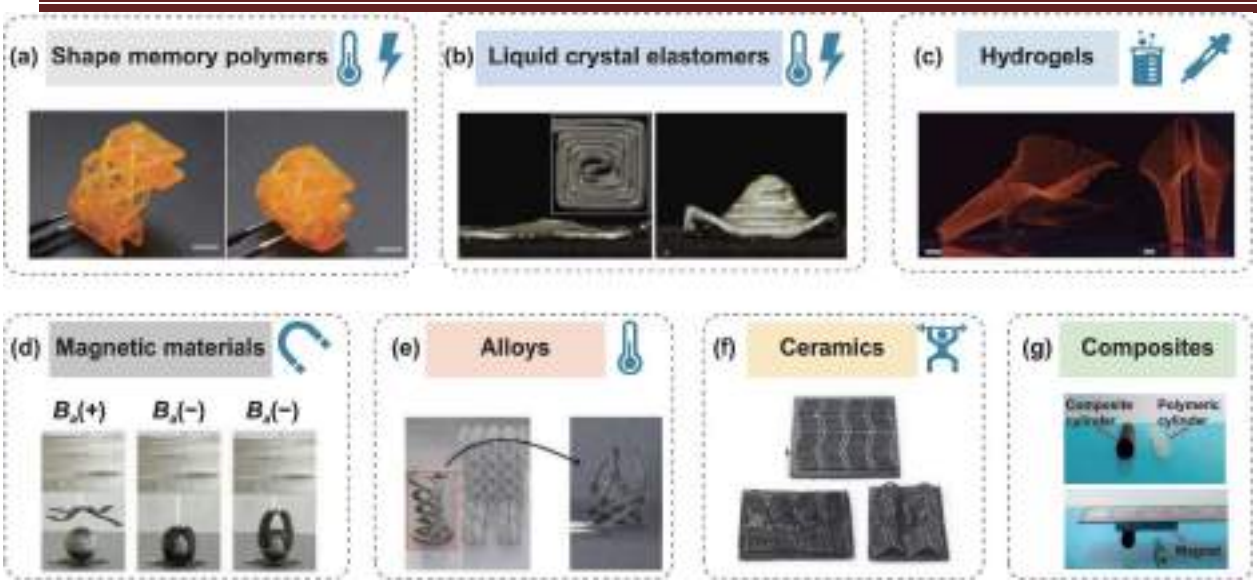
يوضح الشكل 5 عناصر ومكونات الطباعة D4:

- المواد الذكية (القسم الأخضر): تشمل الإستشعار الذاتي، والإصلاح الذاتي، والوظائف.
- التصميم الهيكلي (القسم الأحمر): يغطي المواد، والطب، والمغناطيسية، والإلكترونيات، والبصريات.
- تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد (القسم الأزرق): تتضمن الطي الذاتي والتخصصات المتعددة.
- المحفز (القسم الأصفر): يشمل الهندسة الميكانيكية، والكيمياء، والتجميع الذاتي.

3. المواد والتقنيات:

المواد الذكية وتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد تُشكل الأساس لتطوير هياكل الطباعة رباعية الأبعاد، حيث تتميز الطباعة ثلاثية الأبعاد بقدرتها الفائقة على تخصيص الأشكال الهندسية المعقدة، مما يُعد ضرورياً لتحقيق تصميمات ناجحة في الطباعة رباعية الأبعاد، خصوصاً تلك التي تتطلب توزيعاً محكماً لمواد متنوعة بأحجام مختلفة، ومن بين تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد التي تُستخدم بشكل واسع، تقنيات مثل: نمذجة الترسيب المنصهر (FDM)، الكتابة بالحبر المباشر (DIW)، والطباعة الحجرية المجسمة (SLA).[3] [4]

تُسلط الدراسة الضوء على أهمية المواد الذكية، التقنيات والتصاميم الفريدة، والتطبيقات المتنوعة في مجال الطباعة رباعية الأبعاد، مع التأكيد على أهمية اختيار وتصميم المواد الذكية كشرط أساسي لهذه التقنية، حيث تتميز هذه المواد بالقدرة على الحفاظ على شكل مؤقت واستعادة شكلها الأصلي عند تعرضها لمحفزات خارجية، وتشمل بوليمرات ذاكرة الشكل (SMPs)، اللدائن البلورية السائلة (LCEs)، الهلام المائي، وغيرها من المواد المستخدمة في تصنيع الهياكل الذكية.[2] [3]



الشكل 6 أنواع مختلفة من المواد وخصائصها.[1]

حيث يوضح الشكل 6:

a) البوليمرات ذات الذاكرة الشكلية: تُظهر قدرتها على العودة إلى شكلها الأصلي بعد التشوه.
b) الإيلاستومرات البلورية السائلة: تعرض تحول شكل المادة.
c) الهيدروجيلات: تُسلط الضوء على مرونتها وبنيتها.
d) المواد المغناطيسية: تُقدم مراحل استجابة المادة للمجال المغناطيسي.
e) السبائك: تُظهر بنية معقدة مع تفاصيل بارزة.
f) السيراميك: يُعرض بنماذج وملمس مميز.
g) المركبات: تُوضح اسطوانة مركبة مع مكونات اسطوانية بوليمرية.

3.1 SMPs: تُعتبر بوليمرات ذاكرة الشكل (SMPs) من أكثر المواد استخداماً في الطباعة رباعية الأبعاد، وذلك بفضل قدرتها على التحول من شكلها الأصلي إلى شكل مؤقت عند تعرضها لمحفزات مثل: الحرارة أو الضوء، يمكن لهذه المواد العودة إلى شكلها الأصلي بشكل عكسي، مما يجعلها مثالية لتطبيقات الطباعة رباعية الأبعاد التي تتطلب تغييرات شكل معقدة، كما تُصنع معظم SMPs المستخدمة في الطباعة رباعية الأبعاد باستخدام تقنيات مثل: الطباعة الحجرية المجسمة (SLA) أو معالجة الضوء الرقمي(DLP) ، ومع ذلك يتطلب إعداد راتنجات SMPs للطباعة ثلاثية الأبعاد عملية تخليق كيميائي معقدة، وغالبًا ما تتبع نهج التجربة والخطأ بدلاً من التصميم المتعمد، حيث تختلف تركيبات راتنجات SMPs في الدراسات المختلفة، وقد تم تطوير العديد من الراتنجات بتركيبات متنوعة، مثل تلك التي تحتوي على الميثاكريلات أو الأكريلات، ويُعد اختيار نوع المونومرات والروابط المتشابكة أمراً حاسماً للتحكم في خصائص راتنجات SMP، مثل: سلوك المعالجة ودرجة حرارة التزجج (Tg) والأداء الميكانيكي للمواد المطبوعة. [1] [2] [3]

انظر الملاحق.[1] **Table 1**. Overview of typical 4D printable materials

3.2 LCEs: اللدائن الكريستالية السائلة هي شبكات بوليمرية بلورية سائلة تحتوي على ميزوجينات، وتتميز بقدرتها على الإنتقال بين حالات مختلفة تحت تأثير محفزات مثل: الحرارة والضوء، تُستخدم تقنية DIW لطباعة هياكل LCEs للطباعة D4، وتُعد هذه المواد مثالية للمشغلات بسبب مرونتها وقدرتها على التشغيل أثناء النقل بين الحالات. [1] [2] [3]

3.3 الهلاميات المائية: هي بوليمرات متشابكة تمتص الماء ولا تذوب فيه، تُستخدم في الطباعة D4 لصناعة مواد ذكية تستجيب لمحفزات مثل: الماء ودرجة الحموضة والمجال الكهربائي، كما تُظهر الهلاميات المائية القابلة للإنعكاس خصائص جذابة للتطبيقات الطبية الحيوية، وتُطبع غالباً باستخدام تقنيات DIW أو DLP أو PμSL. [1] [2] [3]

3.4 المواد المغناطيسية: تُعد المواد المغناطيسية للطباعة D4أسهل في التصنيع مقارنةً بالLCEs ، SMPs، والهلاميات المائية، حيث يتم دمج الجسيمات المغناطيسية مع البوليمرات الناعمة لتحقيق تحكم مرن في تغيير الشكل والحركة، فعلى سبيل المثال، يُمكن تزويد البوليمر السيليكوني (PDMS) بخصائص مغناطيسية عبر دمج جسيمات مثل: الحديد والنيوديميوم والحديد والبورون (NdFeB)، مما يُمكّن من تحقيق تغييرات معقدة في الشكل بطريقة قابلة للبرمجة، كما تُستخدم تقنية DIW في طباعة هذه المواد، وتُساهم الجسيمات المغناطيسية ليس فقط كمحفزات ولكن أيضاً كمعدلات ريولوجية لتحسين سلوك الطباعة.[1] [2] [3]

3.5 سبائك ذاكرة الشكل :**(SMAs)** تُعتبر سبائك ذاكرة الشكل من السبائك المعدنية التي تتميز بقدرتها على استعادة شكلها الأصلي عند تعرضها لمحفزات خارجية مثل: الحرارة، وتُصنع هذه السبائك عادةً باستخدام تقنية الذوبان الإنتقائي بالليزر(SLM)، ومن أشهرها سبائك NiTi المستجيبة للحرارة، كما تُستخدم SMAs في تصنيع هياكل ثلاثية الأبعاد معقدة تتمتع بقوة وصلابة عالية وقادرة على التحول استجابةً للتغيرات الحرارية.[1] [2] [3]

3.6 المركبات: تُظهر المركبات الذكية للطباعة D4إمكانيات هائلة بدمج مزايا مواد متعددة، مثل: SMPs و SMAs، مع تحقيق سلوك تأسيسي متطور يستجيب لأكثر من حافز واحد، كما تُسهم المركبات في تعزيز الخصائص الريولوجية للراتنجات، مما يجعلها أكثر ملاءمة للطباعة، خاصةً الطباعة القائمة على البثق، حيث تم تطوير مركبات متنوعة تجمع بين SMPs ومواد أخرى مثل: الهيدروجيل، النانوسيليكا، والمطاط الصناعي، وتُظهر وظائف جديدة مثل: تغيير الشكل بفضل تورم الهيدروجيل أو تنظيم وقت التغيير بواسطة SMPs الحساسة للحرارة.[1] [2] [3]

3.7 السيراميك: على الرغم من أن الدراسات حول السيراميك المطبوع D4أقل شيوعاً، إلا أن هناك تقارير مثيرة للإهتمام تُظهر إمكانياته، على سبيل المثال، تم طباعة سلائف مرنة خزفية باستخدام PDMS وتقنية DIW، والتي يمكن برمجتها في بنى معقدة مثل: طي الأوريغامي، فبَعد المعالجة الحرارية يُمكن تصنيع السيراميك المعقد الشكل، مما يُمكّن من إنشاء هياكل خزفية مطبوعة D4.[1] [2] [3]

4. التصميم الإنشائي الدقيق:

بعد اختيار المواد الذكية وتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد المناسبة، يأتي دور التصميم الإنشائي الدقيق للهياكل المطبوعة D4.

هذه العملية تتطلب تخطيطًا مدروسًا لضمان أن الهياكل المطبوعة تعمل كما هو متوقع عند تعرضها للمحفزات، ويشمل التصميم الإنشائي استخدام تقنيات متقدمة مثل:[1]

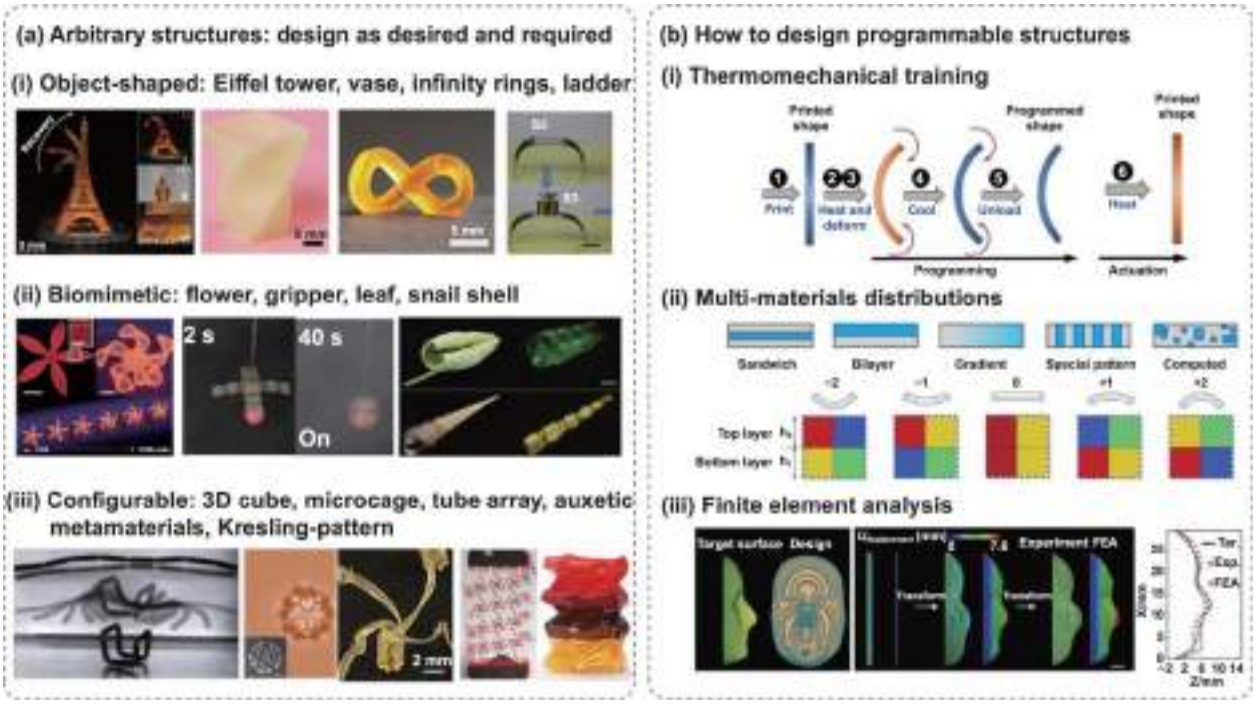
- البرمجة الميكانيكية الحرارية: حيث يتم تشكيل الهياكل لتتبع مسارات محددة عند تعرضها للحرارة.
- توزيعات المواد المتعددة: التي تسمح بدمج أنواع مختلفة من المواد في هيكل واحد لتحقيق وظائف متعددة.
- محاكاة FEA (تحليل العناصر المحدودة): لتقييم الأداء الإنشائي والتنبؤ بسلوك الهياكل تحت ظروف مختلفة.

يُعد التصميم الإنشائي خطوة حيوية لضمان أن الهياكل المطبوعة D4تستجيب بشكل صحيح للمحفزات وتؤدي الوظائف المطلوبة في تطبيقات مثل: الروبوتات اللينة، الأجهزة الطبية، وأجهزة الإستشعار، كما يُمكن أن يؤدي التصميم الدقيق إلى تحسينات كبيرة في الأداء والكفاءة، ويُعد جزءاً لا يتجزأ من عملية الطباعة D4.[8]

الشكل 7 مخطط يتعلق بالهياكل المطبوعة ثلاثية الأبعاد الذكية.[14]

4.1 الهيكل :مع تقدم تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، أصبح من الممكن تصميم وطباعة هياكل متنوعة ومعقدة بحرية، هذه الهياكل تشمل:[1]

- أشكال كائنات مثل: برج إيفل، بالونات، مزهريات، قباب ثلاثية الأبعاد، حلقات، سلالم، مخاريط مربعة، وشرائط موبيوس.
- محاكاة حيوية تشمل: تصميمات تحاكي الزهور، القواقع، الأسماك، الأخطبوطات، الأوراق، قذائف الحلزون، ودعامات القلب والأوعية الدموية.
- بنى قابلة للتكوين مثل: الأقفاص الصغيرة، الشبكات، السقالات، الشبكات الدقيقة، اللوالب الصغيرة، المفصلات، دوائر أرخميدس، قرص العسل، ومجموعات الأعمدة الدقيقة.



الشكل 8 التصاميم الإنشائية وراء الهندسة الميكانيكية.[1]

يعرض الشكل 8 نظرة عامة على تقنيات التصميم والتحليل في هندسة المواد، حيث تتضمن الصورة قسمين رئيسيين:

- الهياكل التعسفية: تصميم حسب الرغبة والحاجة، يُظهر أشكال مختلفة للأجسام، تصاميم بيوميميتيك، وهياكل قابلة للتكوين.
- كيفية تصميم الهياكل القابلة للبرمجة: يشرح عملية التدريب الحراري الميكانيكي، طرق برمجة توزيعات المواد المتعددة وتحليل العناصر المحدودة لتصميم المواد التي يمكن أن تغير شكلها أو خصائصها.

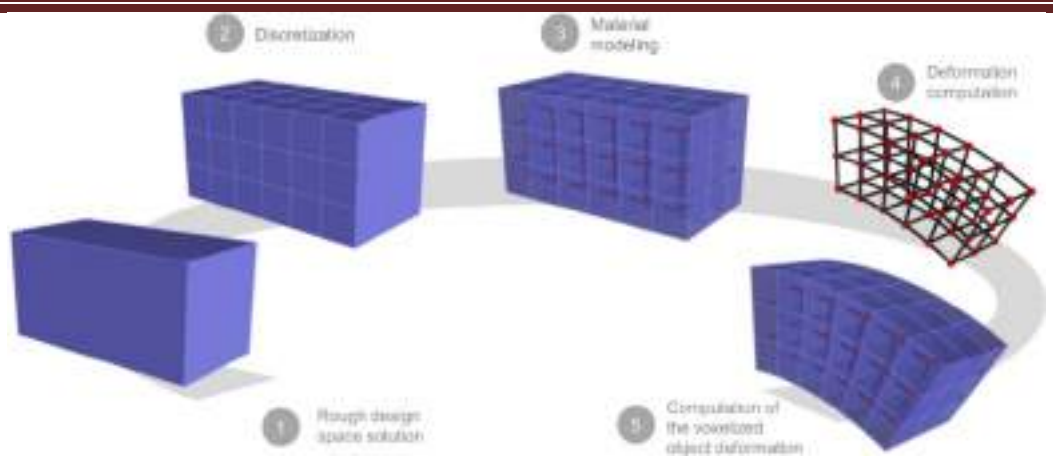
تطورت هذه الهياكل من كونها نماذج عرضية إلى هياكل وظيفية جديدة يمكن استخدامها في تطبيقات عملية، فعلى سبيل المثال، القوابض المطبوعة رباعية الأبعاد تُعد من التصميمات الشائعة التي يمكن تحقيق وظائف متنوعة لها من خلال تصميمات مختلفة للأحجام والأعداد وتوزيعات المواد المتعددة، وآليات مختلفة لإستجابة المحفزات، حيث يمكن لهذه القوابض أن تفتح أو تغلق ببرمجة دقيقة، وتستطيع الإمساك بالأشياء أو إطلاقها استجابةً لمحفزات مثل: الحرارة، الرطوبة، أو الضغط الإسموزي.[4] [5]

كما تم تصميم أقفاص دقيقة معقدة قادرة على التقاط الجسيمات الدقيقة من خلال التورم وإزالة التورم المستجيبَين للمحلول، مما يجعلها مثالية للروبوتات اللينة، الطب الحيوي، وأجهزة توصيل الأدوية. [8] [12]

وفي مجال التحليل النسيجي لخلايا ثلاثية الأبعاد، تم تطوير مصفوفة أنابيب قابلة للتحويل مطبوعة4D تُمكّن من التحليل النسيجي عالي الإنتاجية، مما يُسهل عملية النقل بين الألواح الكبيرة متعددة الآبار وأشرطة الأنسجة الصغيرة، ويُعزز كفاءة الخلايا 3D، كما تم تصنيع المواد الفوقية مع سلوك نسبة بواسون السلبي، حيث تُظهر هذه المواد تشوهاً كبيراً وتتغلب على القيود التقليدية، مما يُوسّع إمكانيات استخدامها في الإلكترونيات المرنة وهندسة الأنسجة.[3] [1]

4.2 البرمجة والمحاكاة :الطباعة 4D تُقدم إمكانية فريدة لتغيير شكل الهياكل المطبوعة ثلاثية الأبعاد، مما يُمكّن من برمجة الهياكل لتحقيق تكوينات ذكية وتطبيقات جديدة، حيث أن البرمجة تتطلب عادةً خطوات متعددة، بما في ذلك: الطباعة ثلاثية الأبعاد، التسخين، التحميل الميكانيكي، التبريد، إزالة الحمل الميكانيكي، النشر/التشغيل.[13] [11]

تُستخدم البرمجة الحرارية الميكانيكية للمواد المستجيبة للحرارة مثل: SMPs، وتتطلب تركيبات خاصة لتطبيق الأحمال الميكانيكية في بيئة حرارية مُنظمة، البرمجة في الموقع أثناء الطباعة ثلاثية الأبعاد ممكنة أيضاً، خاصةً مع LCEs، حيث يُمكن محاذاة وحدات mesogen على طول مسار الطباعة، مما يُنتج تدرجاً في الإتجاه، كما أن الطباعة 4D غير المتجانسة تُمكّن من بناء هياكل قابلة للبرمجة عبر طباعة مواد متعددة متناثرة أو موزعة مكانياً بردود فعل مختلفة، ويُمكن تصنيع هياكل متعددة الطبقات بسهولة، وتصميم توزيعات متناثرة معقدة بفضل التقنيات المتقدمة للطباعة ثلاثية الأبعاد، ولتحقيق تحويلات شكل أكثر تعقيداً، يُعتبر فهم الآليات الكامنة وراء سلوك تحويل الشكل أمراً ضرورياً، أيضاً محاكاة FEA يُمكن أن تساعد في وصف وتوضيح هذا السلوك، حيث يتم إنشاء نموذج نظري يحتوي على العناصر الأساسية للطباعة D3 وسلوكيات المواد، ويُستخدم لمحاكاة الطباعة 4D باستخدام رمز عنصر محدود، ويُمكن لأداة FEA التنبؤ بالهيكلية اللازمة لتحقيق سلوكيات تحويل محددة، وتحسين معلمات التصميم بناءً على المطابقة بين المحاكاة والتجارب، وبالإضافة إلى FEA، يُمكن تطوير طرق محاكاة جديدة تشمل التعلم الآلي، تحسين خوارزميات التصميم العكسي للتنبؤ وبناء هندسة D3متحورة مستهدفة، تُستخدم كأداة رقمية لتحسين البنى بمزيد من الوظائف.[1] [9] [14]

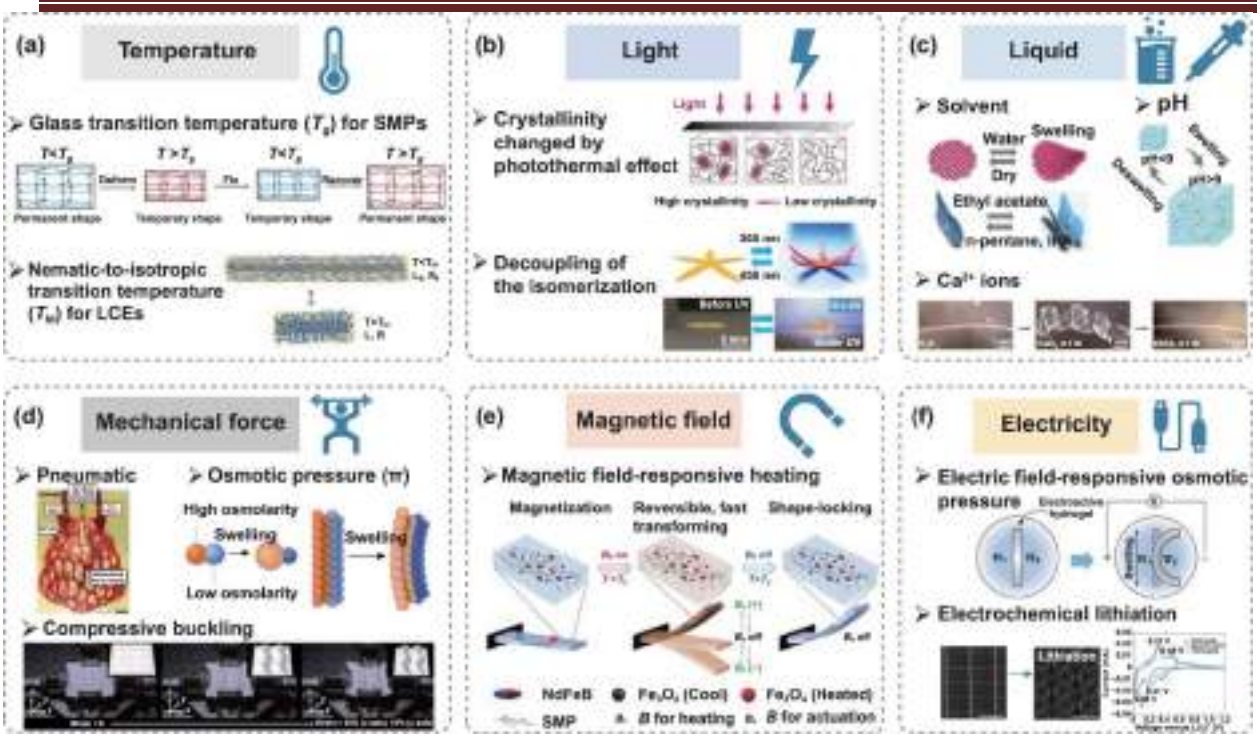


الشكل 9 نمذجة المواد.[14]

1. يظهر مكعب أزرق بسيط يمثل التصميم الأولي للكائن.
2. يُقسم الشكل إلى وحدات أصغر، مشيرًا إلى عملية التقسيم.
3. يُشار إلى الشكل المشبك بنقاط حمراء عند تقاطعات الشبكات، مما يدل على تعيين خصائص المواد.
4. تظهر شبكة حمراء حول جزء من المكعب لحساب التشوه.
5. يُظهر المكعب قد تشوه بناءً على الحسابات.

4.3 المحفزات: التحفيز هو العامل الأساسي لتحقيق التغيير في الشكل والخصائص والوظائف للهياكل المطبوعة ثلاثي الأبعاد، ويعتمد نوع التحفيز المطلوب على استجابة المواد الذكية ويحدد بشكل كبير طبيعة التطبيقات، يلخص هذا البحث أنواع المحفزات للطباعة D4، ويقدم مقارنة بين المزايا والعيوب للمحفزات المختلفة، ويحدد العلاقة بين استجابات التحفيز والخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد، على سبيل المثال، الهياكل المطبوعة للبوليمرات ذات تأثير ذاكرة الشكل (SMPs)، البلورات السائلة المرنة (LCEs)، والسبائك ذات الذاكرة (SMAs)، عادةً ما تستجيب فقط في ظل التحفيز الحراري، هذا يعني أنه عندما يتم تسخين هذه المواد، يمكنها تغيير شكلها أو خصائصها الفيزيائية بطرق محددة، ومع ذلك، هناك بعض المواد الذكية التي تم تصميمها لتكون قادرة على الإستجابة لأكثر من حافز واحد، هذه المواد، المعروفة باسم المواد متعددة المحفزات، يمكن أن توسع بشكل كبير التطبيق العملي للهياكل المطبوعة، مثلاً يمكن تحقيق طباعة D4متعددة المحفزات عن طريق دمج الحشوات الوظيفية في مصفوفة ذكية، والتي تتمتع باستجابة أكبر من المصفوفة الأصلية، كما يمكن أن تتغير الهلاميات المائية القائمة على البروتين المطبوعة D3 شكلها استجابة لدرجة الحرارة ودرجة الحموضة ومحفزات الإنزيم، ومع ذلك، في هذا المسار، عادةً ما يتم تمكين معظم المركبات بالقدرة على الإستجابة للمحفزات لتحويل الضوء إلى حرارة، والمغناطيسية إلى حرارة، والكهرباء إلى الضغط التناضحي، وبالتالي، فإن هذه الإستجابات المتعددة للمحفزات تستجيب بشكل أساسي لنوع واحد فقط من التحفيز، ويوجد مسار آخر هو بناء هياكل متعددة المواد من خلال الجمع بين مادتين ذكيتين (أو أكثر) تستجيب لمحفزات مختلفة، على سبيل المثال، يمكن دمج SMPs المستجيبة لدرجة الحرارة مع الهلاميات المائية المستجيبة للماء، وهلام التورم المستجيب حرارياً مع هلام سلبي غير مستجيب حرارياً، هذه المواد المتعددة المحفزات توفر مرونة أكبر في التصميم والتطبيقات المحتملة .[1] [3]

انظر الملاحق.[1] **Table 2**. Overview of typical stimuli for 4D printing



الشكل 10 محفزات وراء الكيمياء والفيزياء.[1]

يحتوي الشكل 10 على ست لوحات توضح مختلف العمليات الفيزيائية والكيميائية المتعلقة بعلم المواد، تشمل اللوحات ما يلي:

a) تأثير درجة الحرارة على SMPs و LCEs، بما في ذلك درجة الإنتقال الزجاجي ودرجة الإنتقال من النيماتيك إلى الإيزوتروبيك.
b) كيفية تأثير الضوء على البلورية وفصل الإيزومرة تحت ضوء الأشعة فوق البنفسجية.
c) تأثير pH المذيب على انتفاخ الماء والجفاف ووجود أيونات Ca^{2+}.
d) تأثيرات القوة الميكانيكية مثل: الضغط الهوائي، والضغط الأسموزي، والإنتفاخ، والتجعد الضاغط.
e) التسخين المستجاب للمجال المغناطيسي مع تحويل سريع قابل للعكس للشكل موضح بالرسوم البيانية.
f) دور الكهرباء في الضغط الأسموزي المستجاب للمجال الكهربائي والليثيات الكهروكيميائية.

4.3.1 أنواع التحفيز وآليات الاستجابة:

- التحفيز الحراري: الهياكل المطبوعة مثل: SMPs وLCEs وSMAs تستجيب فقط للحرارة.
- التحفيز الضوئي: يشمل الضوء مثل: الأشعة فوق البنفسجية و NIR.
- البيئة السائلة: تستجيب للماء، المذيبات، درجة الحموضة، والأيونات.
- القوة الميكانيكية: تشمل الضغط الهوائي والإجهاد الإنضغاطي.
- المجال المغناطيسي والكهربائي: استجابات للمجالات المغناطيسية والكهربائية.

4.3.2 الإستجابة متعددة المحفزات:

- دمج الحشوات الوظيفية: لتحقيق استجابة أكبر من المصفوفة الأصلية.
- الهلاميات المائية القائمة على البروتين: تغير شكلها استجابة لدرجة الحرارة، درجة الحموضة، ومحفزات الإنزيم.
- الإستجابات المتعددة للمحفزات: تستجيب بشكل أساسي لنوع واحد من التحفيز.
- هياكل متعددة المواد: تجمع بين مواد ذكية تستجيب لمحفزات مختلفة.

5. التطبيقات العملية والتكامل البُعدي:

كتقنية جديدة في مجال التصنيع، أدت الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP)إلى تطور كبير في صناعة الأجهزة الطبية الحيوية المخصصة، هذه الأجهزة تشمل الدعامات، الغرسات، الأطراف الصناعية، والأدوات الجراحية، وقد تم تصنيعها بدقة مكانية غير مسبوقة وحرية في التصميم، بالإضافة إلى ذلك، تم تكييف الطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد من تقنياتDP3 التقليدية لبناء تركيبات بيولوجية تغلف الخلايا مباشرة في أنسجة مثل: الكبد والقلب والأوعية الدموية، ومع ذلك، يتطلب عدد من التطبيقات الطبية الحيوية تغييرا ديناميكيا في الشكل، وهو ما لا يمكن تحقيقه بواسطة تقنياتDP3 التقليدية، على الرغم من أنDP3 قادر على إنشاء أنسجة وأعضاء غير متجانسة باستخدام المواد الحيوية والخلايا الحية، إلا أن الهياكل الثابتة المطبوعة ثلاثية الأبعاد لا يمكن أن تتطابق مع ديناميكيات الأنسجة الأصلية ولا يمكنها تلبية المتطلبات الوظيفية للتطبيقات.[20] [16]

لتلبية هذا المطلب، تم تقديم الطباعة رباعية الأبعاد (4DP)، والتي توسع مساحة D3إلى البعد الرابع (الوقت)، وهذا يسمح بالتحكم المستمر في تطوير المواد الحيوية المطبوعة ثلاثية الأبعاد والأحبار الحيوية، مما يتيح إنتاج أنسجة تشبه الأنسجة الأصلية ويمكنها تغيير الشكل أو الوظيفة بمرور الوقت بناء على المنبهات، حيث أن التصميمات الذكية والمواد الذكية هي مكونات أساسية لـ DP4 لتحقيق سلوكيات تستجيب للمحفزات، ويتم تعريف المواد التي تستجيب للمحفزات الخارجية لتغيير هندستها أو خصائصها على أنها مواد ذكية، كما يمكن أن تكون المنبهات في شكل درجة حرارة أو رطوبة أو درجة حموضة أو ضوء أو ضغط أو مجال مغناطيسي، أيضاً تم استخدام مجموعة متنوعة من المواد الذكية لـDP4 ، بما في ذلك سبائك ذاكرة الشكل المعدنية، وبوليمرات ذاكرة الشكل، والهلاميات المائية المستجيبة للمحفزات، واللدائن العازلة، والمركبات النانوية الذكية .[19]

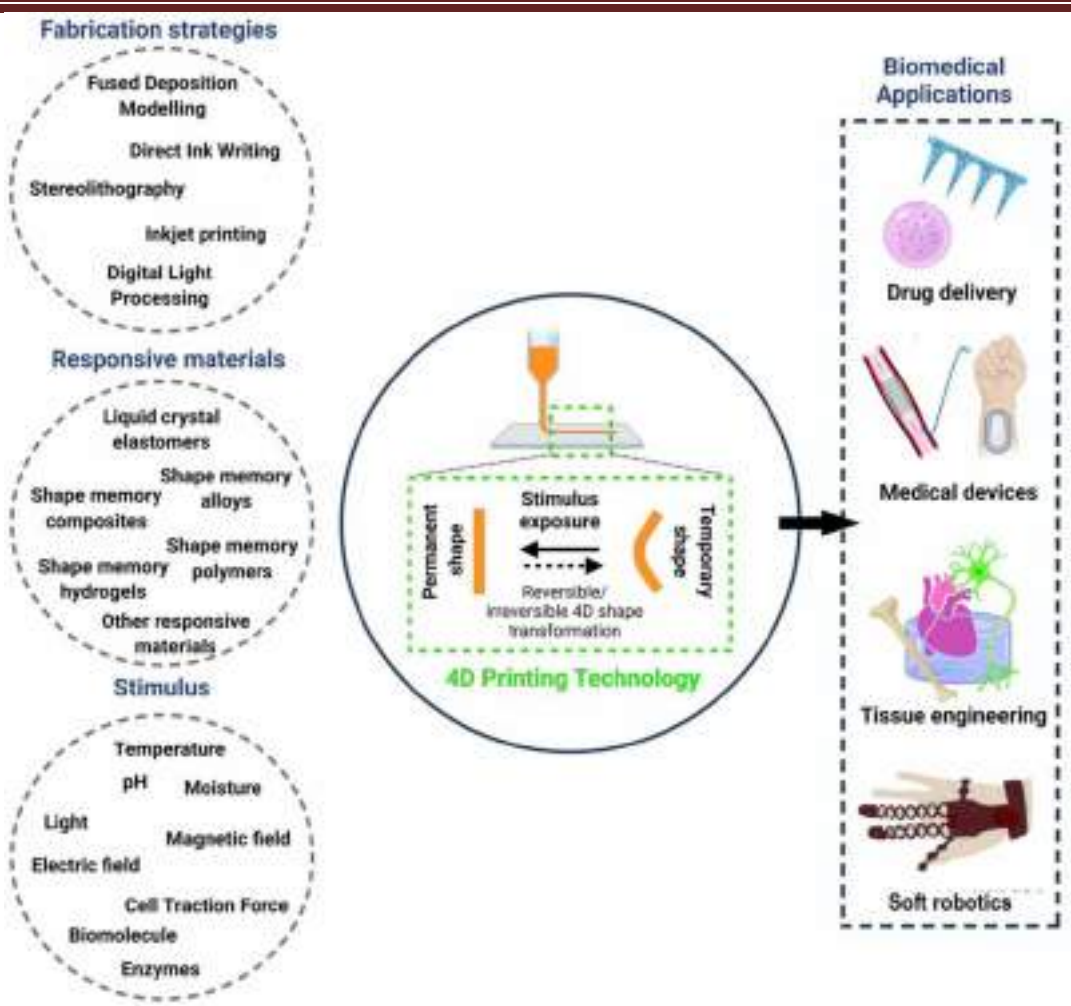
ولهذا، في حين أن هناك تقدماً هائلاً فيDP3 ، ينظر الآن إلى الطباعة الحيوية 4D على أنها تقنية طباعة من الجيل التالي قادرة على تصنيع هياكل تشبه الأنسجة القابلة للتحويل، ولا تزال هناك العديد من القيود حتى الآن، وكانت التقارير حول الطباعة الحيوية D4 محدودة بسبب صعوبة تطوير المواد الطبية الحيوية الذكية المناسبة التي تحتوي على خلايا حية للطباعة.[18]

يتضمن المخطط في الشكل 11ثلاث فئات رئيسية:

- استراتيجيات التصنيع: تشمل نمذجة الإيداع المنصهر، الكتابة المباشرة بالحبر، التصليب الضوئي، الطباعة بالحبر النفاث، ومعالجة الضوء الرقمي.
- المواد المستجيبة: تنقسم إلى مرنات البلورات السائلة، سبائك ذاكرة الشكل/المركبات/الهلاميات/البوليمرات، وغيرها من المواد المستجيبة.
- المحفزات: تشمل درجة الحرارة، الرقم الهيدروجيني، الرطوبة، الضوء، المجال الكهربائي، قوة جذب الخلية، الجزيئات الحيوية، الإنزيمات.

في وسط الصورة، هناك دائرة كبيرة مكتوب عليها "تقنية الطباعة رباعية الأبعاد" مع توضيح لعملية الطباعة ورسم بياني يظهر التعرض للمحفزات يؤدي إلى تحول شكلي رباعي الأبعاد قابل للعكس/غير قابل للعكس.

على الجانب الأيمن من الصورة، هناك فئة أخرى مكتوب عليها "التطبيقات الطبية الحيوية" مع توضيحات تمثل توصيل الأدوية، الأجهزة الطبية، هندسة الأنسجة، والروبوتات الناعمة.



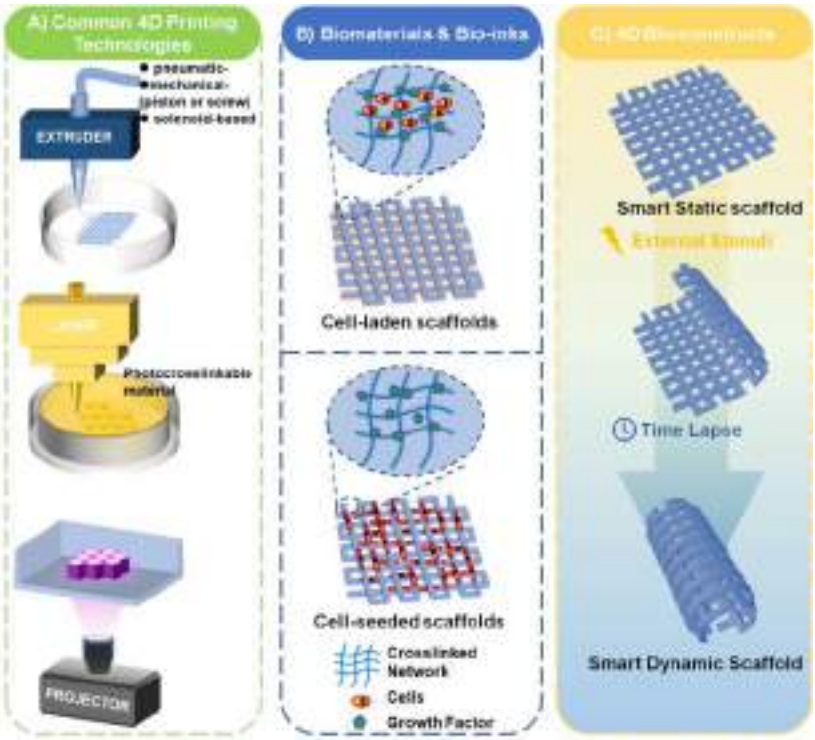
الشكل 11 مخططاً يشرح تقنية الطباعة رباعية الأبعاد (4DP) وتطبيقاتها في المجال الطبي الحيوي.[19]

في هذه الورقة، نقدم نظرة عامة شاملة علىDP4 وتطبيقاته في هندسة الأنسجة والأجهزة الطبية والروبوتات اللينة وأنظمة توصيل الأدوية، نحن نقدم تحليلنا للتحديات والتطورات المستقبلية المحتملة لـDP4 في الهندسة الطبية الحيوية، بالإضافة إلى وجهات نظرنا حول التطورات المستقبلية المحتملة، كما يمكن أن تساهم هذه الورقة في فهم الوضع الحالي لـDP4 والإتجاهات المحتملة في الهندسة الطبية الحيوية والمستحضرات الصيدلانية.

5.1 إصلاح الأنسجة وتجديدها: هندسة الأنسجة والطب التجديدي هو مجال متعدد التخصصات يدمج العِلاجات القائمة على الخلايا والمواد النشطة بيولوجياً والمسامية لاستبدال أو استعادة الأنسجة والأعضاء التالفة، ففي هندسة الأنسجة يجب أن تكون ثلاثة عناصر متناغمة: (أ) مصفوفة (سِقالة*)، (ب) خلايا (خلايا جذعية أو سلالات أولية)، (ج) إشارات (ميكانيكية وفيزيائية وكهربائية و/أو جزيئات مثل: البروتينات والببتيدات والسيتوكينات)، وكعامل رئيسي، توفر السِّقالات الدعم المادي والهيكلي لنمو الخلايا والتمايز، وكذلك نقل العناصر الغذائية، أيضاً يجب أن يحاكي التشكُّل والتركيب الكيميائي للمصفوفة تلك الموجودة في المصفوفة خارج الخلية، مما يحاكي بيئة خارج الخلية التي تشجع الإتصال بين الخلية والمواد، كما يؤثر حجم المسام ومعدل المسامية بشكل مباشر على تكوين الأنسجة داخل سِقالات D3، لذلك يجب تصميم هذه العوامل لاستعادة الأنسجة، فهذه الخصائص ضرورية في توفير إمدادات كافية من الأكسجين لتعزيز تكوين الأوعية، علماً أن الأنسجة شديدة اللدائن وغير ساكنة ولها وظائف فريدة مناسبة للتغيرات الديناميكية في جسم الإنسان، في حين أن الهياكل التقليدية المطبوعة D3 يمكن أن يكون لها أشكال أو بنى أو خلايا محددة، إلا أنها لا تستطيع إظهار العمليات الديناميكية، وبالنظر

إلى ذلك، تلبي الطباعة الحيوية D4 بشكل أساسي متطلبات الطب الحيوي، يوضح الشكل 12 كيف يمكن تطبيق DP4 على تجديد الأنسجة، كما يمكن العثور على نظرة عامة على التطبيقات الحديثة لـ DP4 في هندسة الأنسجة.[17] [15]

انظر الملاحق.[19] **Table 3.** Overview of 4DP applications in tissue engineering



الشكل 12 يشرح تقنيات الطباعة D4 المشتركة والمواد الحيوية والأحبار الحيوية وتشكيلات D4البيولوجية.[19]

يُظهر الشكل 12 جزء من التقنيات، أدوات مثل Extruder :و Laser وProjector ، بينما يظهر جزء من المواد الحيوية خلايا مختلفة داخل الهياكل، وجزء من التشكيلات يظهر تطور"Smart Static Scaffold" إلى . "Smart Dynamic Scaffold"

المواد الأكثر شيوعاً للطباعة الحيوية D4 في هندسة الأنسجة هي الهلاميات المائية و SMPs، وتم التحقيق في مجموعة متنوعة من SMPs لإنشاء منتجات طبية حيوية متحولة الشكل .[16]

*سِقالة: تُستخدم لوصف الهيكل الذي يُبنى عليه النسيج في هندسة الأنسجة، حيث تُشكل السِّقالة بيئة ثلاثية الأبعاد تسمح للخلايا بالنمو والتكاثر لتشكيل نسيج حي.

تتناول الدراسة التي أُجريت، البنية المجهرية للتركيبات وكيف يمكن أن يؤثر محتوى الماء في المستحلبات على هذه البنية، السِّقالات، بفضل قدرتها الإستثنائية على تغيير الشكل وقابليتها للحقن، تمتلك إمكانات كبيرة للزرع طفيف التوغل، كما تم تحميل عوامل النمو في السِّقالات في الموقع، وأظهرت إطلاقاً مستداماً بعد 30 يوماً، بعض SMPs تمت معالجتها عبر DP4 في سِقالات هندسة الأنسجة الذكية التي تخضع لتطور الشكل عند تسخينها، بما في ذلك ميثاكريلات بولي كابرولاكتون وأكريلات إيبوكسيد زيت فول الصويا (SOEA)، ووفقاً للدراسة المنشورة حول الطباعة الحيوية D4، يتم دمج العديد من الهلاميات المائية الطبيعية مع الخلايا الحية لإنتاج أحبار الطباعة الحيوية، هذه الأحبار يمكن استغلالها لطباعة الهياكل الديناميكية ثلاثية الأبعاد مع الخلايا الحية والتحكم الإستراتيجي في تدرج درجة الربط المتقاطع عبر سمك أو مستوى هذه الهياكل، واستجابةً للماء، يمكن لهذه التركيبات المطبوعة بيولوجياً D4 تغيير أشكالها بناءً على خصائص التورم والإنكماش

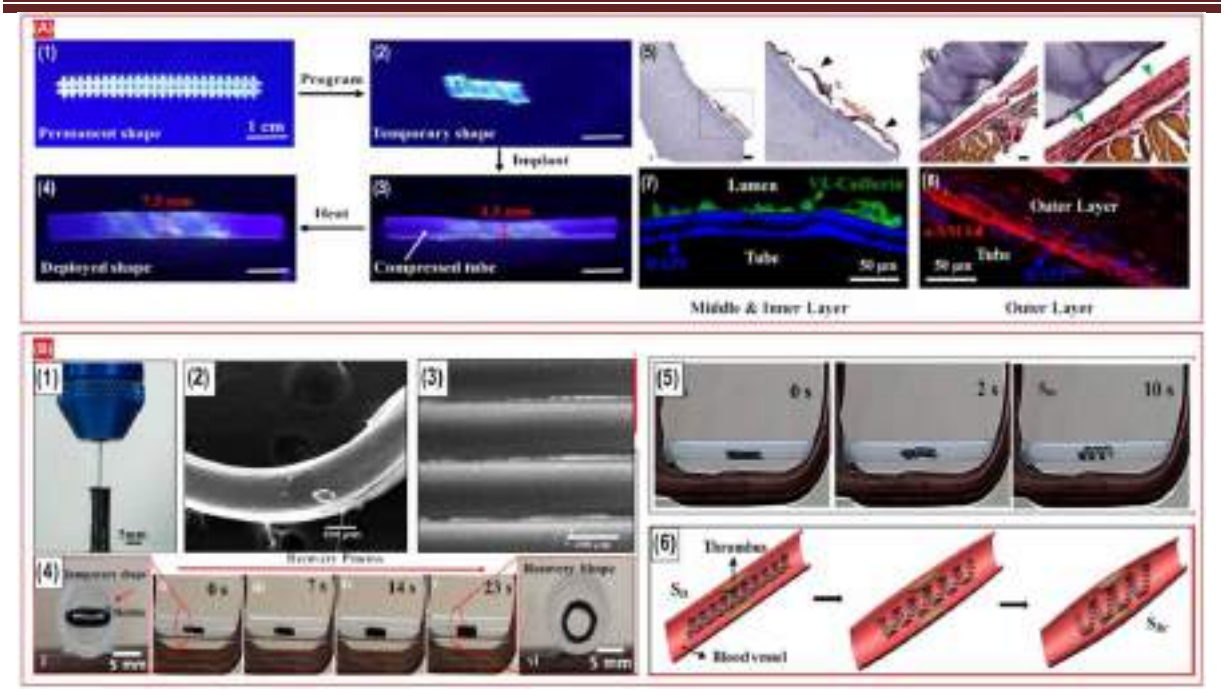
متباينة الخواص للهلاميات المائية، أيضاً تم دمج الخلايا الحية في هياكل ديناميكية مطبوعة بيولوجياً D4باستخدام فيبروين الحرير المتشابك الضوئي، والجيلاتين ميثاكريلويل (GelMA)، وميثاكريلويل حمض الهيالورونيك، واستخدام الطباعة الحيوية D3 لمصفوفة محملة بالخلايا على ركيزة ذاكرة الشكل لإنشاء بنية ثنائية الطور مع الخلايا الحية هو طريقة فعالة أخرى لتحقيق الطباعة الحيوية D4، على سبيل المثال، أنشأ (Luo et al)بنية ثنائية الطبقة تتكون من طبقة تحويل شكل الجينات/البوليدوبامين وطبقة GelMA محملة بالخلايا، بالإضافة إلى التركيبات المتغيرة الشكل والتغييرات الوظيفية المتوقعة التي يمكن أن تحدث بعد النضج، هذه التغييرات تهدف إلى تحقيق وظائف تشبه تلك الموجودة في الأنسجة الطبيعية، حيث تم بالفعل تطوير كائنات ثلاثية الأبعاد مطبوعة تتألف من كرويات الخلية والمواد العضوية، وهناك دراسات تتناول استخدام الخلايا كمحفزات تطبيقية أو كمواد ذكية، أحد الأمثلة على ذلك هو دراسة تتناول تأثير الطي الذاتي باستخدام قوة جر الخلية، وكحافز للشركات الصغيرة والمتوسطة، تم استخدام أنماط وفترات ومفاصل متنوعة من الصفائح الدقيقة المصنفة بالخلايا للتحكم في تطوير أشكال مختلفة من التركيبات المحملة بالخلايا ثلاثية الأبعاد في إجراء يعرف باسم أُوريغامي الخلية.[19]

5.2 تصنيع الأوعية الدموية والأنسجة العضلية وإصلاح القصبة الهوائية: فيما يتعلق بالأوعية الدموية، يمكن استخدام بوليمر ذاتي الطي لبناء أوعية دموية قادرة على تغليف خلايا الدم، كما يمكن تحويل الهلاميات المائية المطبوعة بيولوجياً D4 إلى سِقالات الأوعية الدموية الدقيقة بقطر 20–500 ميكرومتر، أما للأنسجة العضلية، تم إنشاء نمط مصغر هرمي جديد بواسطة (Miao et al) مع استراتيجية فريدة من نوعها للطباعة الحجرية المجسمة الترادفية (PSTS) وأحبار SOEA الذكية، وطوّر Yang et al أيضاً نظاماً للألياف الدقيقة GelMA المحملة بالخلايا لتمكين محاذاة الخلايا وتعزيز التمايز العضلي باستخدام الطباعة الخلوية بمساعدة المجال الكهربائي (EF) ونهجDP4 ، وبالنسبة لإصلاح القصبة الهوائية، باستخدام معالجة الضوء الرقميDLP ، تم تصنيع سِقالة ثنائية الطبقة من الحرير الميثكريلات منقوشة بنمط يمثل حلقات القصبة الهوائية، بشكل عام، يتمتعDP4 بإمكانات ممتازة لتطوير أدوات طبية حيوية مبتكرة، وتحديداً هندسة الأنسجة [3] [18].

(3Table) ملخص للتطبيقات الحديثة لـ DP4 في مجال هندسة الأنسجة.[19]

5.3 الدعامات: الدعامات هي أنابيب بلاستيكية أو معدنية تستخدم في العمليات الجراحية للحفاظ على سالكية التجويف، الدعامات المطبوعة D4 تتميز بقدرتها على تغيير شكلها، مما يسمح بزراعتها بطريقة طفيفة التوغل في الموقع المستهدف في جسم الإنسان، والعديد من الدراسات تستخدم تأثير ذاكرة الشكل الناجم عن درجة حرارة الجسم لتغيير شكل الدعامات [3] [19].

تم تطوير دعامات القصبة الهوائية القابلة للتخصيص المطبوعة D4 التي يمكن أن تتحول من شكل مغلق مؤقتاً إلى شكل مفتوح دائم عند إدخالها في جسم الإنسان، هذا يسمح بزرع طفيف التوغل وتناسب الدعامة بشكل أفضل في منطقة الضرر، أيضاً تم تطبيق DIW على الدعامات داخل الأوعية الدموية على شكل زهرة باستخدام PLMC، حيث أن الدعامات تتمدد ذاتياً من شكل مشوه مغلق إلى شكل موسع عند تسخينها إلى 37 درجة مئوية، بالإضافة إلى تطوير دعامة أنبوبية ذات خصائص ذاتية التمدد والإنكماش باستخدام مواد مركبة SMP مرنة، وتم تسخين الدعامات إلى 100 درجة مئوية، ثم تصفيتها محورياً وتبريدها عند 0 درجة مئوية لتثبيت شكلها في تكوين مغلق، مما يتيح سهولة التسليم إلى الموقع المستهدف، كما تم أيضاً تطوير PGDA SMPمع درجة حرارة انتقالية في حدود°C 37– 20 °C , مما يجعل من الممكن برمجتها بشكل ملائم في درجة حرارة الغرفة ثم التكيُّف تلقائياً مع البيئة الفسيولوجية بعد زرعها في جسم الإنسان، كذلك تم تطوير دعامات D4أخرى مستجيبة للمحفزات بالإضافة إلى المواد المستجيبة للحرارة، حيث يوفر التشغيل عن بعد لنظام الدعامات طريقة فعالة لتصميم الدعامات الوعائية النشطة D4 التي يمكن أن تغير شكلها ولها خصائص متعددة الوظائف.[16]



الشكل 13 التطور التكنولوجي في علاج الأوعية الدموية.[19]

الشكل 13 يعرض جهازاً طبياً مُستخدماً في علاج الأوعية الدموية، حيث يُظهر الجهاز في مراحل مختلفة من الإستخدام والتطبيق:

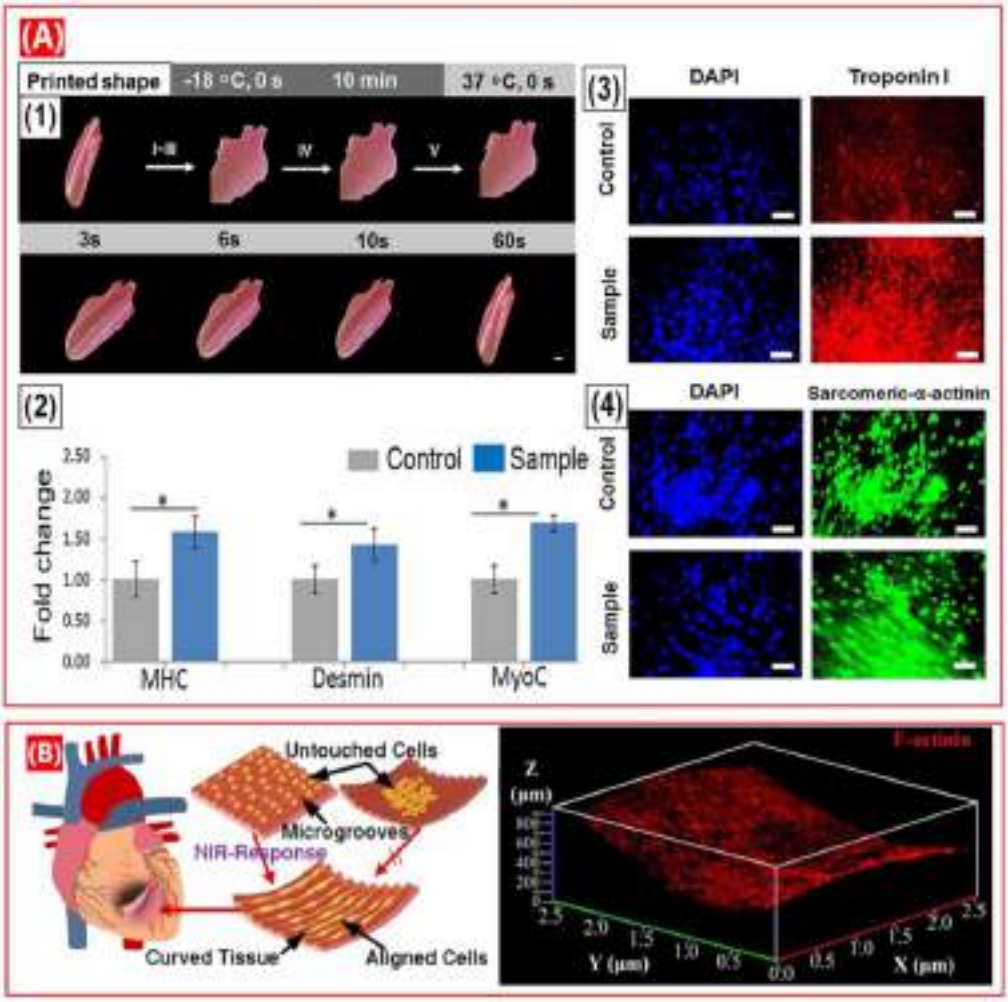
- الشكل الدائم: يُظهر الجهاز بشكله الأصلي قبل البرمجة.
- الشكل المؤقت: يُظهر الجهاز بعد برمجته وقبل الاستخدام.
- الأنبوب المضغوط: يُظهر الجهاز بعد ضغطه للإدخال في الأوعية الدموية.
- الشكل المستخدم: يُظهر الجهاز بعد تسخينه واستخدامه في العلاج.

تُظهر الصور أيضاً التفاصيل المُكبرة لطبقات جدار الأنبوب وكيفية علاج الأوعية الدموية باستخدام الجهاز.

الدعامات تلعب دوراً هاماً في العمليات الجراحية، حيث تساعد في الحفاظ على سالكية التجويف أو استعادتها، والطباعة الحيوية D4 تُمكّن من تصنيع دعامات قادرة على التغيير والتكيُّف مع البيئة البيولوجية للجسم، تم تطوير نوع جديد من SMP المستجيب للحرارة مع مجموعات الأليل المتغيرة القابلة للربط الضوئي، وقد ثبت أن هذه SMPs كانت قادرة على استعادة شكلها وأظهرت قوة ميكانيكية مناسبة في درجة حرارة الجسم، كذلك تم تطوير دعامة بوليمر ذاتية التمدد مطبوعة بتقنية D3 لتجديد صمام القلب باستخدام تقنية FDM، وبالنسبة للدعامة، استخدموا المطاط الصناعي المرن من البوليستر المشترك بالحرارة، وفي حالة الأوعية المتفرعة الضيقة أو المسدودة، تم تطوير دعامة متشعبة قائمة على البولي يوريثين مستوحاة منKirigami ، يتغير التكوين المفتوح على شكل حرف Y إلى هيكل مغلق مؤقت على شكل حرف I عندما تصل الدعامة إلى Tg حوالي 55 درجة مئوية، حيث تطوى الأنابيب المتفرعة في أنبوب واحد بقطر أصغر، بالإضافة إلى ذلك تم تطوير أنبوب ذاكرة شكل يعتمد على التحقق الأمثل من الموائع الدقيقة ونهج نمذجة ديناميكيات الموائع الحسابية لتجنب تضيّق الأوعية الدموية، مما أدى إلى إنتاج دعامة ناجحة في الجسم الحي مزروعة في وعاء قطره أقل من 3 مم .[19]

بشكل عام، هذه التقنية تمكن من تصنيع دعامات قادرة على التكيُّف مع البيئة البيولوجية للجسم، مما يجعلها أدوات فعالة في العديد من التطبيقات الطبية.

5.4 رُقع وصمامات القلب: تطورات جديدة في مجال العلاجات التجديدية لأمراض القلب والأوعية الدموية، حيث يتم استخدام رُقع القلب، وهي سِقالات مُهندَسة بيولوجيّاً، لعلاج أمراض القلب.[3]



الشكل 14 تطور الأنسجة القلبية المطبوعة ثلاثيّاً واستجابتها لـ .NIR[19]

الشكل 14 يُظهر نتائج تجربة علمية معقدة تتعلق بأنسجة القلب، إليك تفاصيل الأجزاء المختلفة:

- الجزء : A(1) يُظهر سلسلة من الصور تُصوِّر تطوُّر شكل مطبوع على مر الزمن وتحت درجات حرارة مختلفة.

(2)رسم بياني يقارن التغيُّر في بروتينات Desmin ، MHC، و MyoC بين مجموعات الضبط والعينات.

(3)صور مجهرية ملونة بـ DAPI و Troponin I تُظهر الهياكل الخلوية في كل من مجموعات الضبط والعينات.

(4) صور مجهرية مشابهة لكن ملونة بـ DAPI و Sarcomeric α−actinin لإبراز هياكل خلوية مختلفة.

- الجزء : Bتوضيح يُظهر خلايا قلبية تستجيب لـNIR ، مما يؤدي إلى تكوين أخاديد دقيقة على نسيج منحني يؤدي إلى توجيه الخلايا.

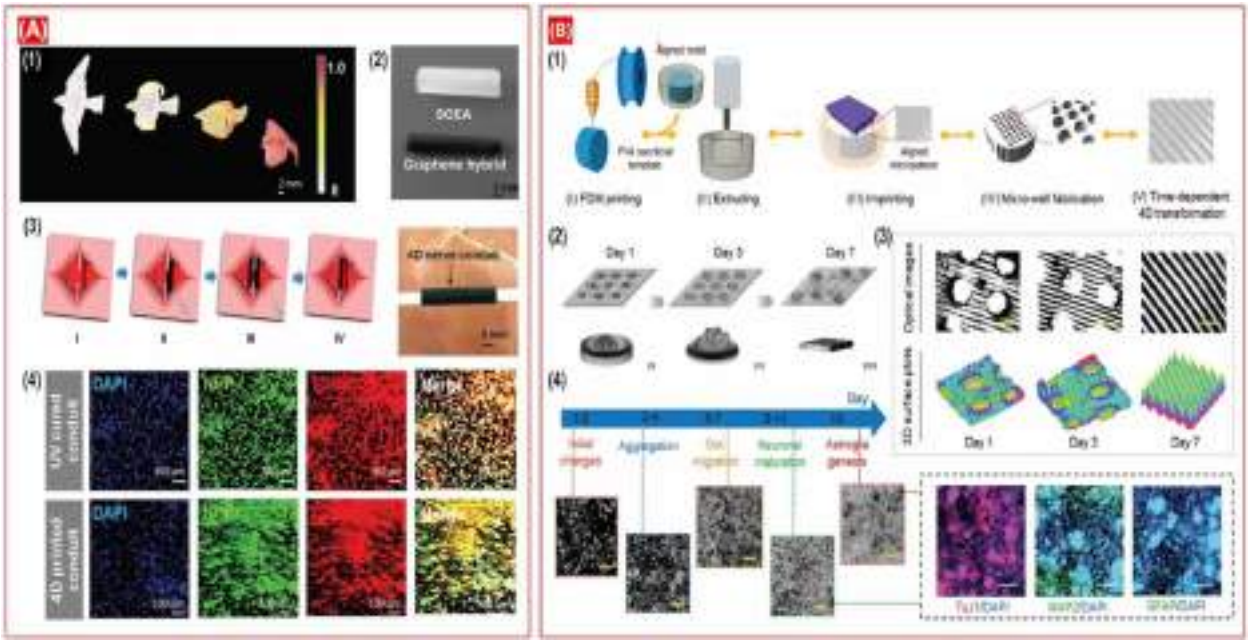
هذه الصورة تعكس التقدم في مجال الهندسة الطبية وتطوير أنسجة القلب الصناعية.

هذه الرُّقع تعمل على تحسين القوة الميكانيكية للمنطقة المتضررة في القلب، ويتم استخدام تقنية D4لتصنيع الأسطح المنحنية ذات الصلة من الناحية الفسيولوجية، بالإضافة إلى دمج التحفيز الميكانيكي الديناميكي، كما تم أيضاً تطوير رُقعة قلبية مجهرية D4 تستخدم أحبار SOEA الذكية، تُظهر هذه السِّقالات توافقاً ملحوظاً للخلايا، وتنمو الخلايا الجذعية الوسيطة البشرية ((hMSCs بنشاط على طول النمط المجهري المُشكَّل، ويمكن استخدام هذه السِّقالة كمفاعل حيوي عضلي.[15]

وفي دراسة أخرى، تم تصنيع رُقعة قلبية ذاتيّة التحول D4 مع القدرة على التكيُّف الميكانيكي الحيوي، وتم إثبات التصميم المحدد للجمع بين قدرة D4 ذاتيّة التحول الجديدة مع البنية المجهرية المتوسعة لتعزيز التكامل الديناميكي للرُّقعة مع القلب النابض والخصائص الميكانيكية الحيوية للرُّقع، الباحثون يبحثون دائماً عن محفزات إبداعية وغير ضارة من شأنها أن تُمكِّن من أداء أفضل فيDP4 ، وفي هذا الصدد، استخدم (وانغ وآخرون) أحبار D4لتوليد هياكل نانوية دقيقة لهندسة أنسجة القلب.[17]

في المستقبل، ستكون الطباعة الحيوية D4مفيدة في التقدم في التحقيقات في الجسم الحي، وستكون التغييرات الهيكلية في الهياكل المزروعة ضرورية بعد الطباعة بسبب التغيرات البيئية أوCTFs ، وفقاً لذلك، درس بعض الباحثين التخطيط قبل الجراحة باستخدام نماذج D4 للتطبيقات المستقبليّة للطباعة الحيوية D4 في الجراحة.[20]

5.5 السِّقالات والقنوات العصبية: تعتبر من أكثر القضايا السريريّة تحدياً في العالم، حيث يتعلق الأمر بتجديد تلف الأعصاب أو العيوب الناجمة عن الإصابات المؤلمة والأمراض العصبية، السِّقالات المطبوعة بيولوجياً D3 تتمتع بميزة واضحة تتمثل في كونها قابلة للتخصيص بدرجة كبيرة، مما يعني أن هيكلها يحاكي العمارة البيولوجية الأصلية للأنظمة في الجسم الحي.[19]



الشكل 15 تطور المواد المركبة والتحليل البيولوجي باستخدام التقنيات الحديثة.[19]

الشكل 15 يعرض عملية تطوير وتحليل مادة مركبة باستخدام تقنيات حديثة، إليك تفاصيل الأقسام المختلفة:

القسم A: (1)يُظهر مراحل مختلفة لمادة تحت المجهر، تتغير من الأبيض إلى الأحمر/الأصفر.

(2) يعرض جسماً مُسمى "SOEA Graphene hybrid".

(3) يوضح القناة العصبية D4 في أربع مراحل مختلفة.

(4) يقدم صوراً مجهرية لخلايا مع وبدون علاج، باستخدام تلوينات متنوعة لإبراز مكونات مختلفة.

القسم B: (1)عملية إنشاء هيكل معقد، بما في ذلك الطباعة بـFDM، البثق، الطبع، تصنيع الحفر/الآبار الدقيقة، والتحول الزمني المعتمد على D4.

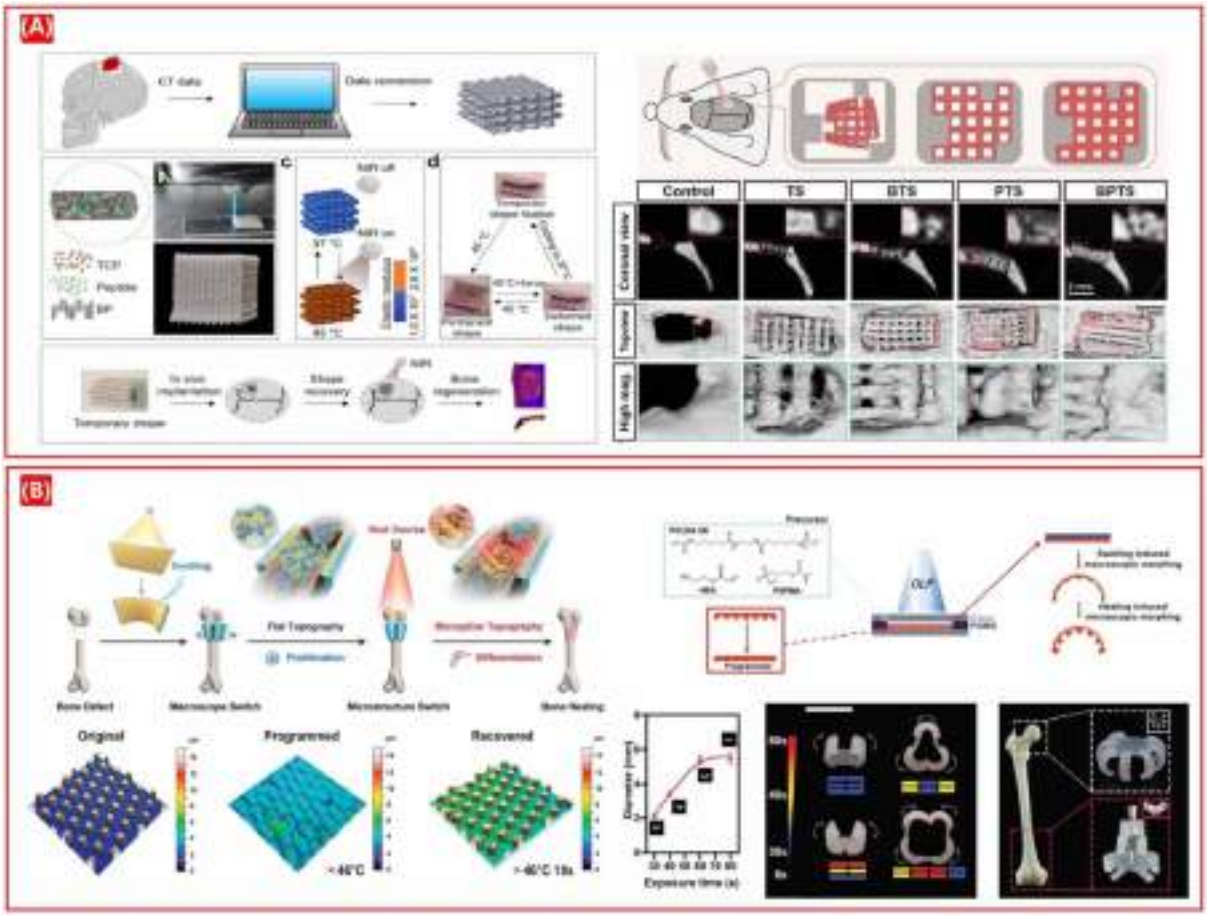
(2) يُظهر التغيرات الفيزيائية على مدى الزمن (من اليوم الأول إلى اليوم السابع) في المادة المطورة.

(3) يحتوي على أنماط بالأبيض والأسود تمثل نتائج تصنيع الآبار الدقيقة.

(4) يعرض التغيرات الخلوية على مدى الزمن مع صور ملونة تشير إلى أنشطة أو مكونات خلوية محددة.

تم تطوير نموذج للدماغ مستجيب حرارياً قائماً على الجرافين الضوئي، وتطوير قناة توجيه عصبية جديدة حساسة لدرجة الحرارة باستخدام حبر SOEA قابل للربط الضوئي وSLA، بالإضافة إلى تطوير وسيط قابل للبرمجة D4 لزراعة NSCs من خلال الجمع بين تقنيات الطباعة والبصم، هذه التقنيات تسمح بتحويل شكل D4 الذي يسمح للمحاور العصبية بأن تصبح محاذاة للغاية كمجاميع خلوية، مما يكرر بيئة دقيقة لتمايز الأنسجة العصبية، على عكس سِقالات الأنسجة الأخرى أو الأجهزة الطبية الحيوية، لا تتطلب ترقيع الأعصاب D4 تعديلات واسعة النطاق أو معقدة على الشكل، ونتيجة لذلك، من المحتمل أن يكون متاحاً تجارياً بسهولة أكبر في المستقبل.[19]

5.6 تجديد العظام: استخدام تقنية D4 في إصلاح الأنسجة العظمية، عن طريق الطباعة ثلاثية الأبعاد في البداية لإصلاح العظام، ولكن بفضل تعقيد شكل عيوب العظام، فإن السِقالات المطبوعة بتقنية D4 تتميز بقدرتها على إعادة تكوينها بسهولة لتناسب العيوب غير المنتظمة الشكل بشكل مثالي.[20]



الشكل 16 تحليل وتحويل البيانات في البحث الطبي والبيولوجي.[19]

الشكل 16 يُظهر مخططات وصور توضيحية لعملية تحويل البيانات والتحليل في مجال طبي أو بيولوجي، يتم استخدام التقنيات المختلفة لتحليل ومعالجة البيانات، وإظهار التغيرات في الأشكال والأنماط.

القسم – (A): يظهر عملية تحويل البيانات من البيانات CT، تتضمن خطوات وتقنيات مختلفة.

- هناك صور لجهاز كمبيوتر، ونماذج ثلاثية الأبعاد، ومشاهدات مجهرية.
- يوضح التحول من البيانات الأولية إلى النتائج المحللة.
- الجانب الأيمن يظهر مراحل مختلفة من شفاء العظام مع صور معلمة.

القسم – (B): يصور عملية أخرى تتضمن التورم وتغييرات التضاريس.

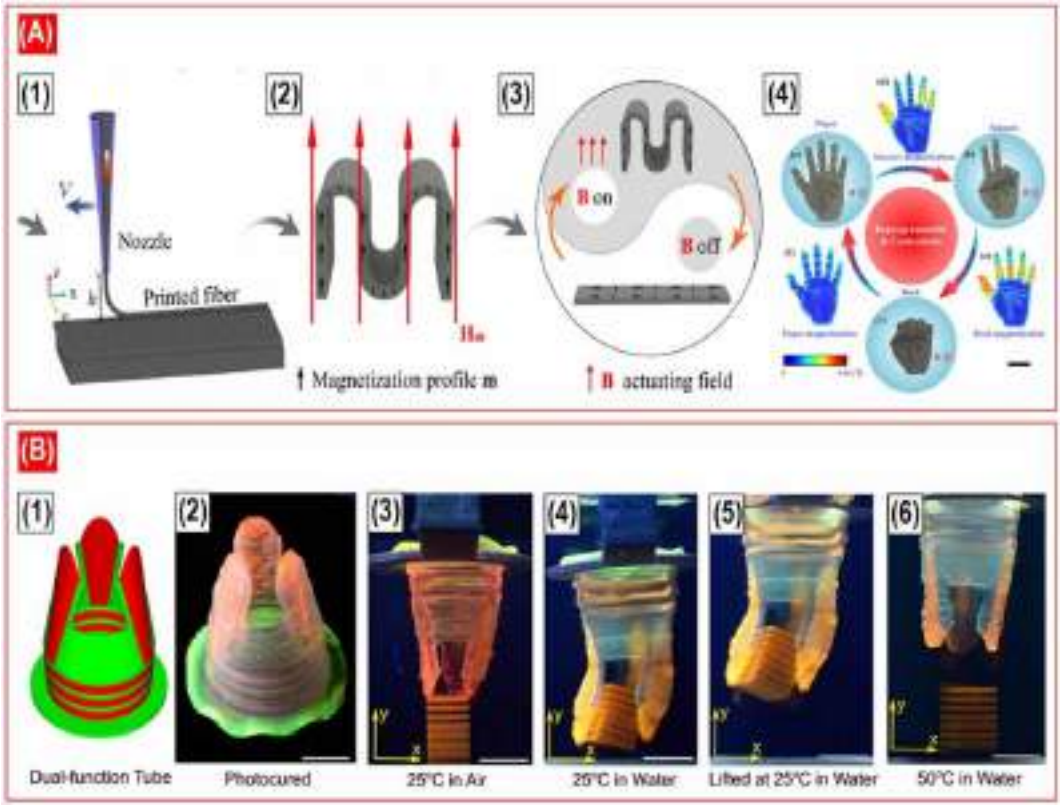
- هناك رسوم بيانية تظهر الحالة الأصلية، والحالة المبرمجة، والحالة المستعادة للمادة.

- تتضمن الرسوم البيانية والمخططات لتمثيل البيانات بشكل كمي.
- الزاوية السفلية اليمنى تظهر تجهيز تجريبي مع الليزر ومعدات القياس.

تم استخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد المبردة لتصنيع سِقالات عظمية ذات شكل مستجيب للحرارة الضوئية، تسبب إشعاع NIR للسِّقالات في زيادة درجة حرارتها بسرعة، مما يسمح لها بالتحول لتتناسب مع شكل عيب العظام، وفي الآونة الأخيرة، استخدم (Wang et al)الطباعة بالبثق، وسِقالات ذاكرة الشكل المستجيبة للحرارة الضوئية المستحثة بـ NIR في التكوين المفتوح المطلوب، حيث بعد تطبيق NIR، يتم تقليل معامل المرونة للسِّقالة بشكل كبير، مما يسمح لها باعتماد تكوين مغلق مؤقتاً، بعد الزرع، سمح التعرض الثاني لـ NIR بملاءمة دقيقة لعيوب العظام غير المنتظمة، وتم إثبات التوافق الدقيق مع عيوب الجمجمة غير المنتظمة للفئران وتعزيز تجديد العظام في الجسم الحي.[19]

5.7 الأجهزة الطبية والروبوتات اللينة: يمكن أن يؤدي دمج DP4 والروبوتات اللينة إلى تأثير تآزري في هذا المجال، حيث تهتم الروبوتات اللينة بإنشاء روبوتات ناعمة قادرة على أداء وظائف معقدة، بناءً على الخصائص المرنة المتأصلة للمواد اللينة.

انظر الملاحق.[19] **Table 4**. Overview of 4DP applications in medical devices and soft robotics



الشكل 17 تقنيات الطباعة الرباعية الأبعاد وتطبيقاتها في مجال الروبوتات اللينة.[19]

يتكون الشكل 17 من قسمين، A وB، كل قسم يحتوي على سلسلة من الصور الفرعية من (1) إلى (6):

القسم A: (1) يظهر رسمًا تخطيطيًا لفوهة تقوم بطباعة ألياف مع جزيئات مغناطيسية متوازية مع اتجاه الطباعة.

(2) يعرض ملف تمغنط بخطوط مجال مغناطيسي تتقارب داخل الألياف المطبوعة.

(3) يصور حالة "تشغيل" و"إيقاف" لمشغل لين على شكل حرف T مع تفاعلات مجال مغناطيسي.

(4) يعرض مواقف مختلفة لأصابع تُظهر الروبوتات اللينة، حيث تنحني الأصابع بفعل تأثير مجال مغناطيسي خارجي.

القسم B: يظهر ست مراحل لتحول جسم مطبوع ثلاثي الأبعاد عند تعرضه لظروف مختلفة.

(1) يوضح التصميم الأولي لأنبوب ذو وظيفتين.

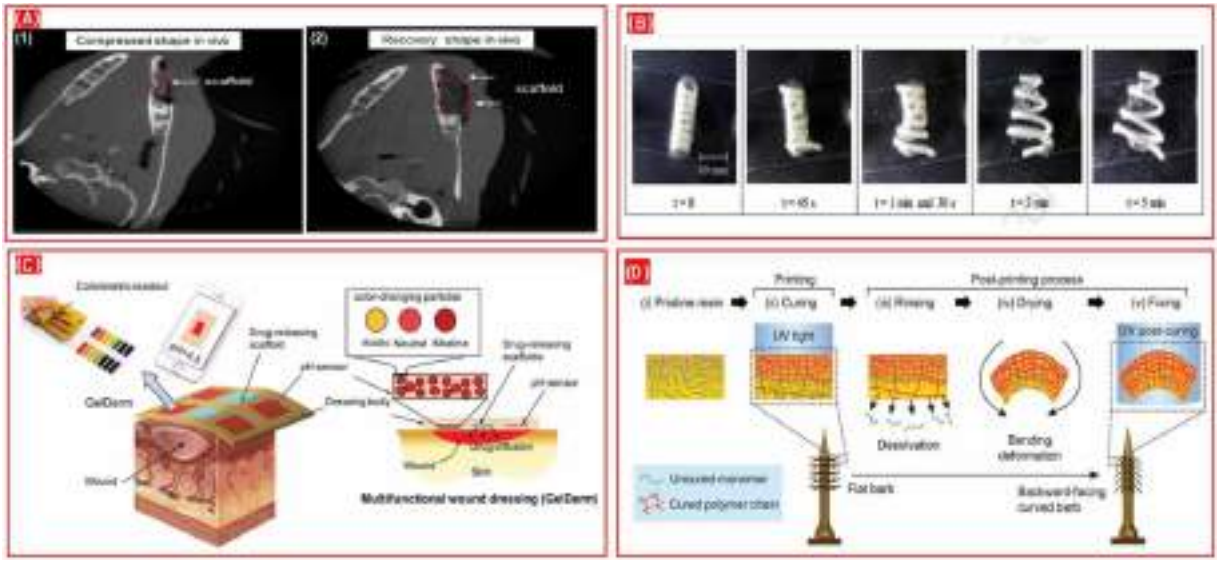
(2) يظهر الجسم بعد التصلب بالضوء.

(3)–(6) تعرض الجسم في درجات حرارة وبيئات مختلفة: في 25 °C في الهواء، في 25°C في الماء، مرفوعاً في 25 °C في الماء، وفي 50 °C في الماء، أما التحولات فهي تشير إلى أن هذه المادة يمكن أن تغير شكلها أو تستعيد شكلها الأصلي عند تعرضها لدرجات حرارة أو بيئات مختلفة.

تم تطوير أجهزة طبية ذكية أخرى باستخدام تقنيةDP4 ، مثل سِقالات اسطوانية مجوفة يمكن أن تكون بمثابة مقاطع بدون خياطة لمفاغرة الجهاز الهضمي، تم أيضاً تطوير المواد اللينة المغناطيسية المطبوعة 4(MASM) Dمع ملامح مغنطة مصممة D3 قادرة على تكييف شكلها وحركتها، وتم تطوير مسد زائدة الأذين الأيسر المطبوع 4(LAAO) Dلمنع جلطات الدم LAA من الوصول إلى مجرى الدم، مما يقلل من خطر الإصابة بالسكتة الدماغية المرتبطة بالرجفان الأذيني.[23]

اقترح كوانغ وآخرون بنية معقدة مطبوعة D3مصنوعة من اللدائن القابلة للتمدد للغاية، وذاكرة الشكل (SM)، والشفاء الذاتي (SH) مع تطبيق محتمل للأجهزة الطبية الحيوية، مثل: أجهزة إصلاح الأوعية الدموية، تم تقديم تطبيق أكثر تقليدية للروبوتات اللينة D4 بواسطة Ilievski et alباستخدامDP3 وصب القوالب باستخدام اللدائن المصنوعة من السيليكون مثل: PDMS ، تتحول القابضات الناعمة الشبيهة بنجم البحر إلى قنوات منقوشة عند استخدام الهواء المضغوط، ويمكن استخدام هذه الأنابيب في التنظير الروبوتي الناعم وزراعة الأوعية الدموية.[19]

5.8 توصيل الأدوية: يشرح كيف يمكن للتقنيات المتقدمة، مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP)والطباعة الرابعة الأبعاد (4DP)، تحسين عملية توصيل الأدوية، ويتم استخدام هذه التقنيات لتصنيع أنظمة توصيل الدواء المبتكرة التي تعزز فعالية الدواء وتقلل من الآثار الجانبية غير المرغوب فيها.[3]



الشكل 18 تطبيقات الطباعة الرابعة الأبعاد في توصيل الأدوية والعلاجات الطبية.[19]

الشكل 18 يتألف من أربعة أقسام مُعَلَّمة بالأحرف A، B، C، D، وكل قسم يُظهِر مرحلة مختلفة أو جانباً مختلفاً من عملية طبية أو علمية تتعلق بمادة السِّقالة.

القسمA : يُظهِر صورتين مُعَلَّمتين بـ "الشكل المضغوط داخل الجسم" وتبدو كصور تصوير طبي لسِقالة داخل الجسم.

القسمB : يحتوي على ثلاث صور تحت عنوان "الشكل المستعاد داخل الجسم"، تُظهِر السِّقالة في أشكال مختلفة داخل ما يمكن أن يكون هياكل عظمية.

القسمC : يُظهِر رسم توضيحي لـ "سِقالة طبية" مع مكونات مختلفة مثل: جسيمات تغير اللون، ومواقع تحميل الدواء، واللباس الجراحي متعدد الوظائف ، (GelDerm)هناك أيضاً رسم بياني مُدرج يُظهِر كيف يستجيب هذا النظام لتغييرات الرقم الهيدروجيني بتغيير اللون وإطلاق الدواء.

القسمD : يُظهِر رسماً توضيحياً لـ "عملية الطباعة D4"، والتي تتضمن خطوات مثل: طباعة مزيج الراتنج، والشفاء بالأشعة فوق البنفسجية، والتجفيف، والتثبيت في الشكل من خلال التجفيف والتشوه لتحقيق شكل سلسلة البوليمر المسطح أو المنحني.

يشير أيضاً إلى الحاجة إلى تطوير أدوية تركز على المريض لتلبية احتياجات الأدوية المخصصة، حيث يمكن أن يستجيب العديد من المرضى بشكل مختلف للأدوية الموصوفة بسبب الإختلافات في الخلفية الصحية والتمثيل الغذائي وعلم الوراثة. كما يتم استخدام المواد المستجيبة للتحفيز، مثل مصفوفة البروتينات المعدنية (MMPs)، لإطلاق الأدوية المضادة للإلتهابات بطريقة مستهدفة، بحيث يتم تحلل الهلاميات المائية المحملة بالأدوية بواسطة الإنزيمات لتوصيل الأدوية إلى مناطق معينة من الجسم حسب الحاجة.[24]

استخدام الطباعة بالبثق لإنشاء بقع مطبوعة D4 تحتوي على الجينات و،pluronic F127DA هذه البقع قادرة على تغيير شكلها واستعادة شكلها الأصلي، مما يتيح إطلاق الدواء بشكل متأخر وانتقائي، فالعديد من التقنيات المتقدمة التي يمكن استخدامها لتحسين توصيل الأدوية وتلبية احتياجات المرضى المختلفة .[19]

انظر الملاحق.[19] **Table 5**. Overview of 4DP applications in drug delivery

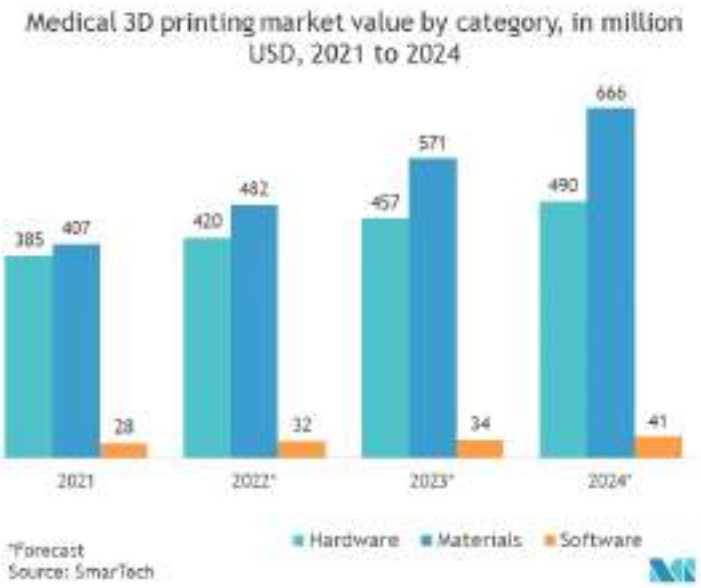
6. التحديات والفرص والتطورات المستقبلية:

الطباعة رباعية الأبعاد لها القدرة على تحويل العديد من الصناعات، بدءاً من الصناعات التقليدية مثل: الصناعات التحويلية، وصولاً إلى الصناعات الناشئة مثل: الطب الحيوي، حيث تساهم هذه التقنية في تحسين الإنتاجية والكفاءة، وتقليل النفايات، وتحسين القدرة على التخصيص.[27]

- التحديات والفرص المتاحة: من بين التحديات الرئيسية التي تواجه الطباعة رباعية الأبعاد هي الحاجة إلى مواد جديدة يمكنها التفاعل مع البيئة أو الإستجابة لها بطرق معينة، كما أن هناك فرصة كبيرة لتطوير مواد جديدة وتقنيات طباعة متقدمة.
- مناقشة النتائج وتحليلها: النتائج الأولية لتطبيقات الطباعة رباعية الأبعاد مشجعة، حيث أظهرت القدرة على إنتاج أجسام معقدة الشكل والوظائف، ومع ذلك، يتعين على الباحثين والمهندسين التغلب على التحديات التقنية والتنظيمية لتحقيق الفوائد الكاملة لهذه التقنية.
- التحديات التقنية والتنظيمية: من بين التحديات التقنية الرئيسية التي تواجه الطباعة رباعية الأبعاد هي الحاجة إلى تطوير مواد جديدة وتحسين دقة الطباعة، أما من الناحية التنظيمية، يتعين على الحكومات والهيئات التنظيمية تطوير إطارات قانونية لضمان السلامة والأمان.
- الفرص في الثورة الصناعية الرابعة: الطباعة رباعية الأبعاد تقدم فرصاً هائلة في الثورة الصناعية الرابعة، بما في ذلك القدرة على تحسين الإنتاجية والكفاءة، وتقليل النفايات، وتحسين القدرة على التخصيص.
- التوقعات للتطورات المستقبلية: من المتوقع أن تشهد الطباعة رباعية الأبعاد تطورات كبيرة في المستقبل، بما في ذلك تحسينات في مواد الطباعة وتقنيات الطباعة، وتطبيقات جديدة في عدة مجالات مثل: الطب والبناء.

أفاد خبراء ومسؤولون مختصون في قطاع الطباعة ثلاثية الأبعاد بأن الصناعة تواجه حالياً تحديات عدة تعوق الإنتشار والتوسع المناسب في استخدامها، لافتين إلى أن أبرز تلك المعوقات تتركز في قلة وعي المؤسسات بأهمية الإستعانة بتلك التقنيات، ونقص الكوادر المتخصصة محلياً وإقليمياً، وارتفاع كلفة الإستخدام.[29]

وأشاروا إلى أن قطاعات الصناعة والبناء والخدمات الطبية هي الأكثر طلباً لتلك التقنيات، وأن دولة الإمارات تعد حالياً بمثابة مركز إقليمي لتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد بدعم تواجد عدد كبير من الشركات المحلية والعالمية، وسرعة نمو الطلب على الإستخدام سنوياً مقارنة بدول المنطقة، لافتين إلى أنه من المتوقع أن تشهد الأسواق خلال الفترة المقبلة نمواً تدريجياً في استخدام تلك التقنيات، مع تراجع أسعار المواد الخام والأجهزة المصنعة عالمياً.[7]



الشكل 19 حجم سوق مواد وخدمات الطباعة ثلاثية الأبعاد وتحليل الأسهم.[13]

المديرون التنفيذيون لشركات "ميت" و"إمانسا" و"بيوند ثري دي" يتحدثون عن التحديات التي تواجه قطاع الطباعة ثلاثية الأبعاد، أشار حيدر الحيدري من "ميت" إلى أن الكلفة المرتفعة وضعف الوعي ونقص الخبرات هي العوائق الرئيسية، ويتوقع أن تتراجع الكلفة تدريجياً مع مرور الوقت وأن الطلب سيزيد مع زيادة الوعي بالتقنية، فهمي الشوا من "إمانسا" يؤكد على هذه التحديات ويدعو إلى زيادة الوعي وتطوير الكوادر المتخصصة، وأضاف جوني ديلا كروز من "بيوند ثري دي" إلى أن الأسعار التي كانت تعتبر تحدياً بدأت تتراجع على المستوى الدولي، مما يشير إلى إمكانية تجاوز هذه العقبة وزيادة الطلب المستقبلي على الصناعة.

وأضاف أن فوائد الطباعة ثلاثية الأبعاد متعددة وتدعم تطوير قطاعات صناعية وتقنية مختلفة، فعلى سبيل المثال من خلال الطباعة ثلاثية الأبعاد أصبح بالإمكان حالياً تشكيل أجهزة طرفية بديلة، بحرفية ودقة أكبر للأفراد الذين يعانون فقد أو بتر أطرافهم لأسباب مختلفة، وبدلاً من التوجه السائد باستخدام قطعة واحدة كطرف صناعي موحد المقاس للشخص، أصبح من الممكن تفصيل قطعة تتناسب مع حجمه وطوله بشكل دقيق وبمواد مختلفة، إضافة إلى أنه يمكن دمجها بشكل أسهل بتقنيات الذكاء الإصطناعي وربطها بمستشعرات الجسد والمخ وبما يجعلها أشبه بالطبيعية.[21]

وأوضح كروز ، أن الطباعة ثلاثية الأبعاد تدعم الإبتكار في الصناعات كافة، وبمجرد تصميم أي قطعة يقترح تركيبها بالأجهزة يتم تشكيلها وفقاً للرسم الهندسي لها، إضافة إلى أنها تلغي التحديات السابقة بعدم وجود قطع غيار معينة للسيارات مع إمكانية تشكيلها بأي خامة عبر أجهزة الطباعة ثلاثية الأبعاد، وأضاف أن القطاعات الأكثر طلباً لتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد بالدولة والمنطقة هي قطاعات الصناعة، والخدمات الطبية، والتصميمات الهندسية والإنشاءات.[26]

وقال الرئيس التنفيذي لمجمع الشارقة للبحوث والتكنولوجيا والإبتكار، حسين المحمودي، إن الطباعة ثلاثية الأبعاد من القطاعات المستقبلية المهمة التي تتنافس الشركات العالمية في أخذ موقع الصدارة فيها، باعتبارها من الصناعات الأساسية

التي ترتكز عليها مقومات الثورة الصناعية الرابعة، ولذلك اهتم (المجمع) بإقامة أكبر معرض للطباعة ثلاثية الأبعاد في المنطقة بقاعات تابعة له خلال بداية شهر أكتوبر وتستمر أعماله أيضاً خلال شهر نوفمبر، ويضم مختلف القطاعات التي تشملها تلك الصناعة بمشاركة عدد من الشركات المحلية والعالمية، كما يهتم بتوفير المقومات اللازمة لتطوير تلك الصناعة بالتعاون مع الشركات المختلفة، وأضاف أن الإمارات تعد من الدول السباقة في تبني تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، ما جعل العديد من الشركات العالمية تفضل العمل بالدولة، لا سيّما مع وجود بعض مؤشرات الطلب التدريجية مقارنة بالعديد من دول المنطقة، وأشار إلى أن صناعة الطباعة ثلاثية الأبعاد تواجه بعض التحديات حالياً، من ضمنها قلة الوعي لدى الشركات بأهمية الإستعانة بهذه التقنيات، ما يتطلب وجود سياسات تحفيزية لدعم استخدامها بشكل أكبر خلال الفترة المقبلة، وأوضح أن الطباعة ثلاثية الأبعاد سيكون لها دور رئيس في مستقبل العديد من القطاعات كالبناء والطب والطيران وغيرها.[22] [28]

ولفت إلى أن مجمع الشارقة للبحوث والتكنولوجيا والإبتكار استقطب خلال عام 2019 شركات عالمية متخصصة في إنشاء الأبنية بتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، إذ تم بناء أول منزل بهندسة معمارية تراثية اعتماداً على تلك التقنيات، وأضاف أننا نعمل في المجمع مع شركاء لنا من أرجاء العالم كافة، لنقل الخبرات في مجال الطباعة ثلاثية الأبعاد التي يتوقع أن تسهم في رفد الإقتصاد العالمي بـ300 مليار دولار بحلول عام 2025، الأمر الذي يوفر الفرص التي تنتظر كل المعنيين بالتكنولوجيا المتقدمة.

7. الأثر الإقتصادي والبيئي:

الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد هما تقنيتان متقدمتان في مجال التصنيع الإضافي، ولكل منهما تأثيراتها الإقتصادية والبيئية والإجتماعية.[30]

- الأثر الإقتصادي: الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد تعد تقنيات مبتكرة توفر فرصاً اقتصادية هائلة، وفقًا لتقرير Gartner لعام 2019، من المتوقع أن تجذب الشركات الناشئة التي تركز على تقنية الطباعة رباعية الأبعاد 300 مليون دولار في رأس المال الاستثماري، كما توقعت الأبحاث أن يصل حجم سوق الطباعة رباعية الأبعاد إلى 488.02 مليون دولار بحلول عام 2026.
- الإستدامة والأثر البيئي: الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد توفر فرصاً لتحسين الإستدامة في العديد من الصناعات، تتضمن هذه الفوائد تصميم منتجات أكثر كفاءة، وتشغيلات إنتاج أكثر كفاءة، وتحسين الإدارة البيئية.
- التأثير الإجتماعي: الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد لها تأثيرات اجتماعية كبيرة، بما في ذلك تأثيرها على سوق العمل، قد تؤدي التقنيات المتقدمة في الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد إلى تغيير الوظائف التقليدية في الصناعة، ولكنها توفر أيضاً فرص عمل جديدة في مجالات مثل: التصميم والهندسة والبحث والتطوير.
- التوزيع الجغرافي للصناعات: الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد موجودة في جميع أنحاء العالم، ولكن الولايات المتحدة هي الرائدة في هذا المجال، ومن المتوقع أن تشهد أوروبا وآسيا والمحيط الهادئ نمواً كبيراً في السنوات القادمة.
- أحدث التطورات: الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد تتطور باستمرار، ففي السنوات الأخيرة، تم تطوير مواد جديدة وتقنيات طباعة متقدمة، ولا يزال هناك الكثير من البحث الذي يجب أن يتم لتحقيق الفوائد الكاملة لهذه التقنيات، فمن خلال التعاون الدولي والإبتكار المستمر، يمكننا توقع مستقبل مشرق لهذه التقنيات.

الشكل 20 سوق تكنولوجيا الطباعة: اتجاهات الصناعة والتوقعات حتى عام 2029.[17]

- معدل النمو: يتناول السوق معدل نمو متوقع بحلول عام 2029.
- أكبر حصة في السوق: يُشير إلى المنطقة التي تمتلك أكبر حصة في السوق.
- الدول المغطاة: يُعرف التقرير بأهم الدول التي يغطيها.
- اللاعبون الرئيسيون: يُسلط الضوء على اللاعبين الرئيسيين العاملين في السوق.

8. الإستنتاجات والتوصيات:

يلعب تكامل الأبعاد من خلال تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد والتقدم في الطباعة رباعية الأبعاد دوراً محورياً في تعزيز الثورة الصناعية الرابعة، حيث تتيح الطباعة ثلاثية الأبعاد، والمعروفة أيضاً باسم التصنيع الإضافي AM، إنشاء كائنات معقدة باستخدام مواد مختلفة، ويقدم التطور إلى الطباعة رباعية الأبعاد البعد الزمني، مما يسمح للمواد بتغيير الشكل أو الخصائص بمرور الوقت، مما يؤدي إلى تطبيقات في مجالات متنوعة مثل: الرعاية الصحية والروبوتات والفضاء، وبالتالي هذا التكامل للوقت في تقنيات الطباعة يفتح فرصاً جديدة للمنتجات المخصصة، وتحسينات كفاءة سلسلة التوريد، وإنشاء أشكال هندسية معقدة كانت في السابق صعبة الإنتاج، علاوة على ذلك، فإن استخدام المواد الذكية جنباً إلى جنب مع الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد يعزز استجابة المنتجات وتخصيصها، لا سيّما في مجال التكنولوجيا المساعدة للأفراد ذوي الإعاقة [25][31].

لا يؤدي الجمع بين هذه التقنيات إلى إحداث ثورة في عمليات التصنيع فحسب، بل يُمهّد الطريق أيضاً للتطبيقات المبتكرة في مختلف الصناعات، مما يدفع الثورة الصناعية الرابعة إلى الأمام.[33]

تقنية الطباعة D4تعتبر ثورية وتجذب اهتمام الباحثين في مجالات متعددة بسبب تأثيرها المحتمل على التصميمات المتعددة الوظائف للمعماريات D3، هذه التقنية تركز على المواد الذكية، التصميم الهيكلي، آليات الإستجابة والوظائف الجديدة، والعلاقة بين هذه العوامل تشكل جوهر الطباعة D4، كما أن الحافز يلعب أيضاً دوراً مهماً في تحديد الوظائف الجديدة التي تنشأ من تصميم هيكل التطبيقات المحددة، ويجب أن يكون البحث في المواد الذكية القابلة للطباعة أولوية، وينصح بطباعة مواد متعددة لتعزيز قابلية البرمجة وتمكين التحويلات المعقدة .[27]

من حيث تقنيات الطباعة، يجب التغلب على تحدي الطباعة D3 متعددة المواد، كما يجب تطوير تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد عالية الدقة لإنشاء هياكل نانوية معقدة، ويتطلب تصميم الهياكل المطبوعة رباعية الأبعاد أدوات تصميم حسابية لبرمجة الوقت في الهياكل بطريقة منهجية وقابلة للتحكم، كما يمكن أن يساهم التقدم في الذكاء الإصطناعي وأساليب التعلم الآلي في تطوير أدوات الجيل التالي لتصميم الهياكل المطبوعة رباعية الأبعاد، وفيما يتعلق بنموذج التصميم، يجب تنفيذ البنى عبر تمثيلات متعددة، ويمكن تحقيق الوظائف المتعددة من خلال التصميمات الفنية التي تتضمن حالات متعددة وتكوينات متعددة وتحويلات متعددة، وتتطلب تقنية الطباعة D4 تتويجا للمعرفة من المجالات متعددة التخصصات، ويمكن استكشاف التطبيقات الجديدة في قطاعات متعددة، التي تدمج تقنيات التصنيع المضافة مع المواد المستجيبة للمحفزات، لتفتح إمكانيات جديدة للمواد والهياكل متعددة الوظائف، ومع ذلك لا زالت تواجه هذه التكنولوجيا تحديات كبيرة تتعلق بالمواد الذكية، تقنيات الطباعة، طرق وقت البرمجة، وأدوات التصميم الحسابي .[32]

- الطباعة رباعية الأبعاد تتيح تحويل البنيات المطبوعة ثلاثية الأبعاد بمرور الوقت.
- تنشئ روابط بين المواد الذكية وتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والوظائف الجديدة.
- تُستخدم الطباعة في الصناعة 4.0 للمنتجات المخصصة وكفاءة سلسلة التوريد وخفض التكلفة.
- تفتح الطباعة رباعية الأبعاد فرصاً في القطاعات الناشئة بمواد قابلة للتكيُّف.
- الطباعة رباعية الأبعاد هي جيل جديد من الطباعة ثلاثية الأبعاد.
- يمكن دمج التحفيز الكهربائي والغرسات الذكية في الرعاية الصحية.
- يمكن دمج التصوير رباعي الأبعاد مع الطباعة رباعية الأبعاد في مختلف المجالات.
- تعرض الورقة التطبيقات الطبية الحيوية للطباعة رباعية الأبعاد في مختلف المجالات.
- تعتمد الطباعة رباعية الأبعاد على الوقت، وتعتمد على المحفزات، وتعتمد على التصميم، وتعتمد على المواد.
- تقدم AM منتجات ذات أداء أفضل وعمليات إنتاج مخصصة وفعالة من حيث التكلفة.
- يمكن دمج AM في الصناعة 4.0 والتنمية المستدامة.

في الختام، تقنية الطباعة D4 لا تزال غير معروفة نسبياً، ولكن إذا تمكن الباحثون في مجالات متعددة من تصميم هياكل قابلة للتكيُّف والإستجابة، فإن هذه الوظائف الجديدة يمكن أن تحدث ثورة في عالمنا وتعزز التكنولوجيا الذكية، ونتوقع أن تتطور تقنية الطباعة D4 بسرعة بناءً على مزاياها الفريدة وشعبيّتها الأوسع وزيادة التعاون متعدد التخصصات.

المراجع:

[1] Z. Lyu, J. Wang, and Y. Chen, “4D printing: interdisciplinary integration of smart materials, structural design, and new functionality,” International Journal of Extreme Manufacturing, vol. 5, no. 3, p. 032011, Jul 2023.

[2] I. Elmagdob, K. M. Arhoumah, F. S. Ali, and A. Musbah, "4D Printing in Healthcare:Technology Evaluation, Applications, and Market Size Forecasting," African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS), Vol. 1, Isuue 1, pp. 31-40, 2022.

[3] A. A. Ahmed and I. Elmagdob, “ التصنيع بالإضافة والتحديات المستقبلية: نظرة عامة على الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد,” ResearchGate, Aug 2022.

[4] A. Asmaeil, S. Abukraa, K. M. Arhoumah, and A. A. Ahmed, “تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد ومستقبلها في العالم العربي,” ResearchGate, May 2019.

[5] A. Kantaros, T. Ganetsos, and D. Piromalis, “3D and 4D Printing as Integrated Manufacturing Methods of Industry 4.0,” American Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 16, no. 1, pp. 12–22, Jan 2023.

[6] A. Kantaros, T. Ganetsos, and D. Piromalis, “4D printing: technology overview and smart materials utilized,” Journal of Mechatronics and Robotics, vol. 7, no. 1, pp. 1–14, Jan 2023.

[7] “3D Reconstruction Technology Market Growth, Demand & Forecast 2029,” Data Bridge Market Research, https://www.databridgemarketresearch.com, All Right Reserved 2024, Nov 01, 2021.

[8] R. Sreenivasulu, “Industrial Digitalization with Four Dimensional (4D) Printing - Novel Technology: Brief Review on Developments, Challenges and Applications,” Gazi University Journal of Science :, vol. 35, no. 2, pp. 682–693, Jun 2022.

[9] H. M. Pan, “Advanced materials in 3D/4D printing technology,” Polymers, vol. 14, no. 16, p. 3255, Aug 2022.

[10] P. John, V. R. Komma, and S. P. Bhore, “4D Printing-A Smart Way of 3D Printing: A Brief review,” in Lecture notes in mechanical engineering, 2022, pp. 25–34.
[11] C. Liu, “Development and application of 3D printing technology in industrial design,” Xue Xi Yu Jiao Yu, vol. 10, no. 5, p. 119, Mar 2022.
[12] J.-B. Bai, N. Author_Id, N. Author_Id, G. Bu, N. Author_Id, and N. Author_Id, “Progress in 4D printing technology,” Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, vol. 2, no. 1, p. 2022001, Jan 2022.
[13] A. Mishra and A. Behera, “A critical review on 4D printing and their processing parameters,” IJIDEM, Dec 2023.
[14] B. Shen, O. Erol, L. Fang, and S. H. Kang, “Programming the time into 3D printing: current advances and future directions in 4D printing,” Multifunctional Materials, vol. 3, no. 1, p. 012001, Jan 2020.
[15] A. Neagu, “4D printing: definition, smart materials, and applications,” in Elsevier eBooks, 2023, pp. 13–51.
[16] M. A. Naniz, M. Askari, A. Zolfagharian, and M. Bodaghi, “4D bioprinting: Fabrication approaches and biomedical applications,” in Elsevier eBooks, 2022, pp. 193–229.
[17] B. Subramanian, P. Das, S. Biswas, A. Roy, and P. Basak, “Polymers for additive manufacturing and 4D-printing for tissue regenerative applications,” in Elsevier eBooks, 2023, pp. 159–182.
[18] D. K. Mishra, R. Kandi, D. K. Pathak, and P. Sharma, “3D-Printed metal oxides for biomedical applications,” in CRC Press eBooks, 2023, pp. 369–382.
[19] M. A. Naniz, M. Askari, A. Zolfagharian, M. A. Naniz, and M. Bodaghi, “4D printing: a cutting-edge platform for biomedical applications,” Biomedical Materials, vol. 17, no. 6, p. 062001, Sep 2022.
[20] F. Kabirian, P. Mela, and R. Heying, “4D printing applications in the development of smart cardiovascular implants,” Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, vol. 10, May 2022.
[21] I. Dumanska, D. Vasylkivskyi, I. Zhurba, Y. Pukhalska, O. Matviiets, and A. Goncharuk, “Dronology and 3D printing as a catalyst for international trade in industry 4.0.,” WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 17, pp. 740–757, Jul 2021.
[22] L. V. K. Reddy and N. K. J. Prakash, “A review on 4D printing—the next industrial Revolution,” Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 325–331, Dec 2019.
[23] H. Y. Jeong, S.-C. An, Y. Lim, M. J. Jeong, N. Kim, and Y. C. Jun, “3D and 4D Printing of Multistable Structures,” Applied Sciences, vol. 10, no. 20, p. 7254, Oct 2020.
[24] N. Puls, D. Carluccio, M. D. Batstone, and J. I. Novak, “The rise of additive manufacturing for ocular and orbital prostheses: A systematic literature review,” Annals of 3D Printed Medicine, vol. 4, p. 100036, Dec 2021.
[25] A. Paszkiewicz, M. Bolanowski, G. Budzik, Ł. Przeszłowski, and M. Oleksy, “Process of creating an integrated design and manufacturing environment as part of the structure of industry 4.0,” Processes, vol. 8, no. 9, p. 1019, Aug 2020.
[26] K. Deshmukh, M. T. Houkan, M. A. AlMaadeed, and K. K. Sadasivuni, “Introduction to 3D and 4D printing technology: State of the art and recent trends,” in Elsevier eBooks, 2020, pp. 1–24.
[27] R. M. Mahamood, T. C. Jen, S. A. Akinlabi, S. Hassan, Kamar. O. Abdulrahman, and E. T. Akinlabi, “Role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0,” in Elsevier eBooks, 2021, pp. 107–126.
[28] R. G. Burela, J. N. Kamineni, and D. Harursampath, “Multifunctional polymer composites for 3D and 4D printing,” in Elsevier eBooks, 2020, pp. 231–257.
[29] D. J. Horst, C. A. Duvoisin, and R. De Almeida Vieira, “Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review,” SciSpace - Paper, Aug 2018.
[30] M. D. Moiz and G.Mallikarjuna, “An Investigation of Fused Deposition Modeling based 3D Printers for Industry 4.0 Applications,” SciSpace - Paper, Nov 2020.
[31] J. Menon and A. Fink, “The Fourth Industrial Revolution and its implications for regional economic integration in ASEAN,” Journal of Asian Economic Integration, vol. 1, no. 1, pp. 32–47, Apr 2019.
[32] G. C. Dumitrescu and I. A. Tanase, “3D printing – a new industrial revolution,” SciSpace - Paper, Jan 2016.
[33] M. M. Gunal, “Simulation and the Fourth Industrial Revolution,” in Springer series in advanced manufacturing, 2019, pp. 1–17.

الملاحق:

Table 1. Overview of typical 4D printable materials[1].

Materials	3D printing technique	Stimulus	Functionality	Structure
Shape memory polymers *Advantages:* ● Relatively stiff structure ● Relatively high actuation speed *Drawbacks:* ● Complex chemical synthesis ● Requiring external loads	PμSL	Temperature	Recovery	Eiffel tower, grippers, flower
	TPL	Temperature	Recovery	Hinge
	DLP	Temperature	Recovery	Kelvin foam
	DLP	Temperature	Mechanically robust	Balloon, mesh, tent, dog
	SLA	Volatilization, heat	Self-folding	Buckyball, flower, Miura-ori
	DIW	Temperature	Self-healing	Archimedean spiral, honeycomb, vase, Gumby
	IJP	Temperature	Transformation	Leaf and snail shell
	DLP	Temperature	Strain isolation, active deployment	Microlattice
	DLP	Temperature	Recovery	Microlattice
	SLA	Temperature	Recovery	Cardiovascular stent, Eiffel tower, bird
	DLP, DIW	Temperature	Self-folding	Infinity rings, cubic grids
	—	Temperature, magnetic	Recovery	Cantilever, gripper
	PμSL	Temperature	Mechanically tunable	Microlattices with octet-truss and Kelvin foam
	FDM	Temperature	Recovery	Sanxingdui bronze mask
	DLP	Temperature	Recovery	Gothic architecture, fox, gripper
Liquid crystal elastomers *Advantages:* ● No need for aqueous environments or external loads *Drawbacks:* ● Complex chemical synthesis	DIW	UV-light	Actuator	Flower, braille-like
	IJP	Temperature (Joule heating)	Recovery	Laminated hinge
	DIW	Temperature	Self-sensing	Spiral architectures
	DIW	Humidity	Self-folding	Bilayers, flower, concentric square array, soft gripper,
	DIW	Temperature	Recovery	Mesh
	DIW	Temperature	Recovery	Texture, honeycomb
	DIW	Temperature, UV	Lock-in	Square cone, Möbius strip
	DIW	Water	Color change	Beetle
Hydrogel *Advantages:* ● Multiple stimuli-response ● Aqueous environments for biomimetic and biomedical applications *Drawbacks:* ● Soft structures ● Slow responsive speed ● Unstable actuated shapes ● Requiring aqueous environments	DIW	Solvent (water)	Biomimetic	Flowers, orchid
	DIW	Ca^{2+} ions	Self-folding	Tubes
	LDW	pH	Biomimetic, particle capture	Flower, microcage
	PμSL	Temperature	Biomimetic	Gripper, dumbbell
	PμSL	Osmotic pressure	Soft robotic actuation	Gripper
	IJP	Temperature	Biomimetic	Fish, octopus
	DLP	Solvent (acetone)	Actuators, electronic devices	Origami
	DLP	Solvent (water)	Changing	Theatre, helix, tulip flower
	DIW	pH	Living cell	Pillar gripper, flowers
	DIW	Temperature, pH, enzyme	Cargo transport and delivery	Hexagon, cube lattice, cylinder
	DLP	Solvent (water)	Biomimetic	Tetragonal lattice, sea stars
	DIW	Temperature	Biomimetic	Flower, palm
	LDW	pH	Biomimetic	Flytrap
	SLA	Solvent (water)	Biomimetic	Benchy, stent-like mesh

	DIW	pH	Biomedical, cell culture	Scaffolds
	DIW	Fe^{3+} ions, sodium lactate/UV	Biomedical	Bilayer strips
Magnetic materials *Advantages:* ● Fast response speed ● Simply making composites	DIW	Magnetic field	Soft robotic actuation	Auxetic structure, annular ring,
	DIW	Magnetic field	Biomimetic	3D butterfly
	—	Magnetic field	Soft robotic, sequential logic circuits	Grippers, antennas
	DIW	Magnetic field	Biomedical	Scaffold, microspiral, waviness
	DLP	Magnetic field	Biocompatible	Needles
Alloy *Advantages:* ● Stiff structures *Drawbacks:* ● High responsive temperature	SLM	Temperature, loading	Recovery	—
	SLM	Temperature	Recovery	Curved sheet, spring coil
	SLM	Temperature	Recovery	Rings
	L-PBF	Temperature	Self-healing	Spider-like, lattice, metamaterial structure
	TPL	Electrochemically driven reaction	Recovery	Tetragonal microlattices
Composite *Advantages:* ● Multiple stimuli-response ● Multiple materials	DIW	Temperature, water	Recovery	Ladder, bench, ring
	—	Temperature	Recovery, healing	Micropillar array
	DLP	Heat	Recovery	Flower
	IJP	Temperature	Biomimetic	Wavy, 3D dome, flower
	FDM	Magnetic	Biomedical	Occluders
	FDM	Temperature, press	Self-sensing	Scaffold
	—	Solvent	Lighting, microscopy	Lenses
	DIW	Temperature, water	Recovery	Raster, ring, butterfly
	DIW	Near-infrared light (NIR)	Brain model	Hand gesture, exerciser, folded brain, dilated heart
	—	Temperature	Self-assembly in a modular fashion	Miura-, kresling-patterned, interlock-loop, origami
	FDM	Microwave, water, Temperature	Biomimetic	Flower
	DLP	Joule heat	Flexible actuators	Bat wing
Ceramic	DIW	Stress	Mechanical robustness	Origami

Table 2. Overview of typical stimuli for 4D printing [1].

Stimulus	Responsive materials	Responsive mechanisms	Responsive speed	Limitations
Temperature	SMPs, LCEs, SMAs, Hydrogels	Glass transition temperature (T_g), nematic-to-isotropic transition temperature (T_{NI})	Middle	Need to heat up to a high temperature
Light	LCEs	Photothermal effect	Low	Need a UV light
Liquid	Hydrogels	Swelling ratio	Middle	Need to be in a liquid environment
Mechanical force	SMPs, Hydrogels, Ceramics	Pneumatic pressure, osmotic pressure, compressive buckling	Fast	Need gas, water, or external force
Magnetic field	Magnetic materials	Magnetization	Fast	Need a magnetic field but is safe and effective

Electricity	LCEs, Hydrogels, Silicon	Joule heating, Electric field-responsive osmotic pressure, Electrochemical lithiation	Low	Need an external electric circuit

Table 3. Overview of 4DP applications in tissue engineering [19].

Applications	Stimuli	Materials [a]	Cells [b]	Printing techniques [c]
3D cell culture, histological study	Temperature	PEGDA, Bis-EMA	Human neural progenitor cell	PμSLA
3D cell culture (neural)	Temperature	PVA (microstructured mold preparation), PMMA (microwell imprinting mold) BDE, PBE, and DA (4D ink)	Mouse NSCs	FDM, SLA, replica molding and imprinting
Vascular tissue engineering	Water	Alg-MA, HA-MA	D1 cells	Extrusion
Vascular tissue engineering, stent	Temperature	PGDA	—	Extrusion
Cardiac tissue engineering	Temperature	SOEA	Human MSCs	PSTS
Cardiac tissue engineering	Water (solvent-induced stress relaxation)	GelMA and PEGDA	Human (iPSC-CMs), humanMSCs, HUVECs	SLA
Cardiac tissue engineering	NIR-induced photothermal effects	PEGDA (mold preparation) BDE, PBE, DA, and graphene nanoplatelets (4D ink)	Human (iPSC-CMs), humanMSCs, HUVECs	DLP and replica molding
Neural tissue engineering	Temperature and NIR- induced photothermal effects	PVA (mold preparation), BDE, PBE, DA, and graphene nanoplatelets (4D ink)	Mouse NSCs	FDM, extrusion, and replica molding
Neural tissue engineering	Solvent (water/ethanol), temperature	SOEA (with/without graphene)	Human MSCs	SLA
Neural tissue engineering	Magnetoelectric	4-HBA, PU-EO-PO monomer, and electro-magnetized carbon porous nanocookies	PC12 cells	DLP
Bone/ cartilage tissue engineering	Water	Oxidized Alg–MA	NIH-3T3 cells, human adipose-derived stem cells	Extrusion
Bone tissue engineering	Water, pH, Calcium ions	Oxidized Alg–MA and GelMA	Human MSCs	Extrusion
Bone tissue engineering	Temperature	PU, superparamagnetic iron oxide nanoparticles (combined with gelatin or PEO)	Human MSCs	LTDM
Bone tissue engineering	NIR-induced photothermal effects	BPNS, β-TCP, and p(DLLA–TMC)	Rat MSCs	Extrusion
Bone tissue engineering	Temperature	Poly (propylene fumarate)	—	DLP
Bone tissue engineering	Water, Temperature	PCLDA-2000 and PCLDA-10 000 (micropatterned SMP layer) HEA, PCLDA-2000, and SPMA (hydrogel layer)	Rat MSCs	DLP

Bone tissue engineering	Thrombin, alkaline phosphatase	PEGDA (700)	NIH-3T3 cells	DLP
Bone tissue engineering	Temperature	Castor oil and PCL triol	Human MSCs	Extrusion
Trachea tissue engineering	Magnetic field	PLA, Fe_3O_4 nanoparticles	—	Extrusion
Trachea tissue engineering	Water and NaCl	Sil-MA	Human/rabbit chondrocytes and TBSCs	DLP
Muscle tissue engineering	Temperature	PCL triol and poly(hexamethylene diisocyanate)—coated PCL	Human MSCs	FDM
Muscle tissue engineering	Calcium ions	Alg–MA and PCL	C2C12 cells	Extrusion, MEW
Muscle tissue engineering	Water	HA-MA and PCL–PU	C2C12 cells	Extrusion, MEW
Tissue engineering	Water	GelMA (top layer) Carboxylated GelMA (bottom layer) PEI/HA/Alg/Alg-gelatin (sacrificial layer)	HUVEC	Inkjet
Tissue engineering	NIR-induced photothermal effects	Alg and polydopamine(for shape morphing) Alg and GelMA (for cell encapsulation)	293 T HEK cells	Extrusion
Tissue engineering	Temperature	SOEA	Human MSCs	SLA
Tissue engineering	Temperature	Collagen conjugated-polyether urethane (MM3520)	Human MSCs	Extrusion
Tissue engineering	Temperature	pAAm, pNIPAAm, Alg, and sugar particles	—	Extrusion
Tissue engineering	Water, temperature	HBC-MA	—	SLA
Tissue engineering	Temperature	Agarose, pAAm, and LAPONITE®	—	Inkjet
Tissue engineering	Temperature	PLA	—	Extrusion
Tissue engineering	Water	PEGDA, HEMA, SPMA, AUD, and MEO2MA	—	SLA

Table 4. Overview of 4DP applications in medical devices and soft robotics[19].

Applications	**Stimuli**	**Materials** [a]	**Cells**	**Printing techniques** [b]
Surgical suture, self-expandable stents/scaffolds	Temperature	PLMC	—	DIW
Suture-less sealant clips	Temperature	RS and PHBV	—	Extrusion
Intravascular stents	Temperature	PLA, benzophenone, and Fe_3O_4 nanoparticles	—	DIW
Endoluminal devices	Temperature	PCL-MA	—	SLA
Left atrial appendage occluder	Temperature, Magnetic field	PLA and Fe_3O_4 nanoparticles	—	FDM
Biomedical devices, soft robotics	Magnetic field	PDMS, DBP, fumed silica, and NdFeB nanoparticles	—	Extrusion
Wearable assistive devices	Magnetic field	Nylon and ferrofluid	—	SLS

Elbow protective devices	Temperature	Unsaturated PLA–PCL copolymer	—	FDM
Vascular repair devices	Temperature	PCL, AUD, and nBA (with/without silica nanoparticles)	—	DIW
Biomedical devices, soft robotics	Temperature	pAAm and pNIPAAm	—	DIW
Biomedical devices, soft robotics	Temperature	Alg, pNIPAAm, PEGDA, and LAPONITE®	—	Extrusion
Biomedical devices	Water, temperature	PU elastomer (swellable and non-swellable) and PE (heat-shrinkable)	—	Extrusion
On-demand microparticle capture and release	pH	Acrylic acid, pNIPAAm and PVP	—	FsLDW
Biomedical devices, soft robotics	Temperature, pH, enzyme	Pickering emulsion gels BSA-MA + pNIPAAm (thermo- sensitive ink), BSA-MA + p(DMAEMA) (pH-sensitive ink), BSA-MA + F127 (enzyme- sensitive ink)	—	DIW
Biomedical devices	Temperature	Agarose, pAAm, and LAPONITE®	—	Inkjet
Biomedical devices (origami- based)	Temperature	PLA	—	Extrusion
Soft robotics, biomedical actuators	Water	PEGDA, HEMA, SPMA, AUD, and MEO2MA	—	SLA

Table 5. Overview of 4DP applications in drug delivery [19].

Applications	**Stimuli**	**Materials**	**Cells**	**Printing techniques**
Drug delivery	Water, temperature	PU elastomer (swellable and non-swellable) and PE (heat-shrinkable)	—	Extrusion
Drug release	Magnetoelectric	4-HBA, PU-EO-PO monomer, and electro-magnetized carbon porous nanocookies	PC12 cells	DLP
Drug delivery system for gastric retention	Water, temperature	PVA	—	FDM
Drug delivery	Temperature, pH, enzyme	Pickering emulsion gels BSA-MA + pNIPAAm (thermo-sensitive ink), BSA-MA + p(DMAEMA) (pH-sensitive ink), BSA-MA + F127 (enzyme-sensitive ink)	—	DIW
Drug delivery (barbed microneedles)	Desolvation and drying	PEGDA	—	PμSLA
Drug delivery (retentive intravesical devices)	Water	PVA and glycerol	—	FDM
Drug delivery (hydrogels)	Ionic crosslinking (calcium and carbonate ions)	F127DA and Alg	—	Extrusion