الطباعة رباعية الأبعاد كتقنية قائمة على التقليد الحيوى لإنتاج فراغات تتفاعل مع البيئة المحيطة

مشيره فريد محمود قنديل

مدرس بقسم التصميم الداخلى والأثاث بكلية الفنون التطبيقية جامعة دمنهور

Submit Date:2023-08-23 19:01:49 | Revise Date:2024-01-10 11:46:17 | Accept Date: 2024-01-21 18:46:10

DOI:10.21608/jdsaa.2024.231318.1368

ملخص البحث:-

ا فى عصر تكنولوجيا الطباعة الرقميه ، قادت تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد ثورة التصنيع، ومن خلال منهجيات متعددة لتطوير الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Print-ing)، أضاف هذا التطور الوقت كبُعد رابع للحصول على أجزاء طباعة رباعية الأبعاد، يتحدى هذا التطور عمليات الطباعة التقليدية بإستخدام المواد غير التقليدية (مثل المواد الحيوية المستجيبة للمُحفزات) التى تسد الفجوة بين عمليات التصنيع والطلب المتزايد، والتصميمات الفعالة والأكثر مرونة وتكيفاً مع البيئة ، حيث تركز الطباعة ثلاثية الأبعاد 3DP على طباعة هياكل ثابتة من مادة واحدة وبالتالى لايمكن تلبية جميع متطلبات الوظائف الديناميكية اللازمة لمواكبة عصر التكنولوجيا، في حين أن التصميم الذي يتم إنشاؤه بواسطة الطباعة رباعية الأبعاد قادر على تغيير شكله إستجابةً للعوامل البيئية، من هنا كان الحاجة إلى التطور من الطباعة ثلاثية الأبعاد إلى الطباعة رباعية الأبعاد (4D Printing) . حيث يتناول البحث دراسة مفهوم تكنولوجيا الطباعة الرباعية الأبعاد وتأثيرها فى تفاعل المبنى مع الظروف البيئية المحيطة ومواكبة عصر التكنولوجيا، والتحرر من قيود الأبعاد الثلاثية التى بدورها أثرت على خواص البعد الرابع وهو الزمن، فكان لابد من السعى إلى مظلة أشمل وهى إدخال خواص البعد الرابع ومعرفة المواد الحيوية رباعية الأبعاد لإنتاج هياكل أكثر مرونة مع البيئة المحيطة، لذا يهدف البحث إلى التعرف على تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد من بداية التصنيع المضاف والتقنيات المستخدمة وآلية التشغيل ومعرفة المواد الحيوية النشطة المستخدمة والمُحفزات المسببة لحركة الهيكل المطبوع، ثم التعرض إلى المفاهيم والتعريفات حول علم محاكاة الطبيعة ومفهوم الطباعة رباعية الأبعاد كتقنية قائمة على التقليد الحيوى لإنتاج مبانى تتفاعل مع البيئة المحيطة، بالإضافة إلى تحليل لبعض تطبيقات الطباعة رباعية الأبعاد، وكيفية الإستفادة منها وتطبيقها فى التصميم الداخلى.

الكلمات المفتاحية:-

الطباعة ثلاثية الأبعاد ، طباعة رباعية الأبعاد ، المواد الحيوية النشطة ، التصنيع بالإضافة .

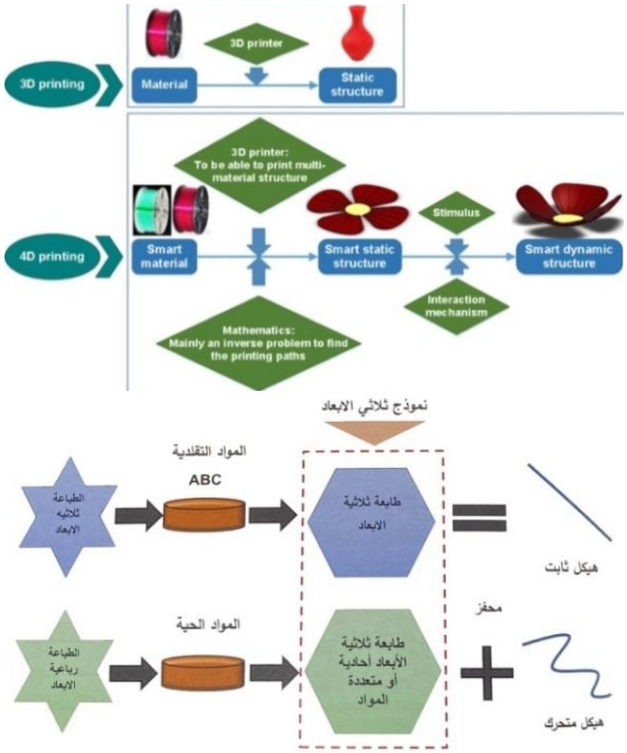
المقدمة : فى بداية القرن العشرين كانت الإنطلاقة العظمى فى عالم المعرفة هو الحاسب الألى وقول أنه "مجرد أداة" تقلل من شأن الأثر الكبير الذى أحدثه الحاسب الألى وتطبيقاته فى ثقافة علوم التصميم بشكل عام التصميم الداخلى والهندسة المعمارية بشكل خاص،فقد أتاحت أجهزة الكمبيوتر والتقنيات الرقميه المستخدمة فى التصميم تطوراً كبيراً،على سبيل المثال إضافة أبعاد زمنية جديدة للتصميم،مما أعطى حلولاً تصميميه لانهائية،وقد بدأ المعماريين والمصممون فى تطبيق أفكار التصميم الرقمى على أرض الواقع وصارت من الممكن تحقيقها تدريجياً، كما ظهر مؤخراً فى التشكيل الداخلى والمعمارى برامج جديدة لعملية التشكيلات الرقمية، حيث مكنت هذه البرامج المصممين من بث عمليات تصميمية جديدة فى أعمالهم وإضافة أشكال وأسطح معقدة، كما كان لإستخدامات الكمبيوتر أثراً واضحاً فى المساهمة فى ظهور مواد جديدة تخلق تكنولوجيا جديدة فى التصميم، ومن ضمن هذه الأفكار الجديدة التى ظهرت مع هذا التحول تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد 4D Printing وهى تطور لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد 3D Printing ولكنها تختلف عنها إختلافا كبيراً فى الفكر والمضمون والمرونه فى التصميم .

أجريت أبحاث متعددة بشأن تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد 4D Printing فى الكثير من المجالات داخل علوم الحاسب،هندسة الفضاء،الأجهزة الطبية الحيوية،المواد الحيوية،ومجالات العمارة، إلا أن ما نرصده فى مجال العماره هو ما قاله سكيلر تيبيتس Skylar Tibbits فى مفهوم المواد الذكية المطبوعة رباعية الأبعاد 4D Printing فى عام ٢٠١٣ فى خطابه فى مؤتمر TED فى معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (الولايات المتحدة الأمريكية) Massachusetts Institute of Technology (MIT)، فهى تكنولوجيا جديدة تسمح للهيكل المطبوع ثلاثى الأبعاد بتغيير شكله أو خصائصه أو وظيفته بمرور الوقت بفعل المُحفزات المختلفة.

١- مفهوم الطباعة رباعية الأبعاد (4D Printing) :

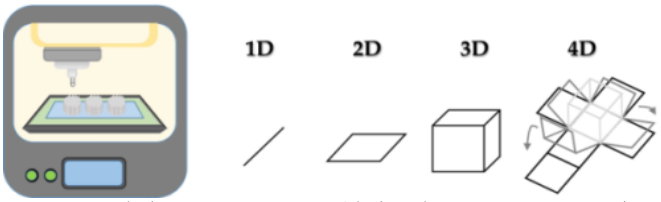
يمكن إعتبار الطباعة رباعية الأبعاد (4D Printing) كنموذج تصنيع متطور للعلماء والمهندسين والمصممين، مما يمثل طفرة نوعية مهمة جداً لنجاح الثورة الصناعية، حيث تستخدم فى مجالات متعددة من الصناعة، وعرف سكايلر تيبيتس Skylar [1] Tibbits.خلال مؤتمر TED فى معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا Massachusetts Institute of Technology (MIT)[2]فى عام ٢٠١٢ كيف تحدث التحولات فى مجسم مطبوع ثابت (ثلاثى الأبعاد) بمرور الوقت، لقد لوحظ أن الهيكل الثابت ثلاثى الأبعاد يمكن أن يتحول بمرور الوقت إلى هيكل متحرك أكثر مرونة ، حيث يمكن أن يبدل ويغير شكله نتيجة لمُحفز خارجي أو آلية تفاعل ،

وبالتالي ، يمكن ملاحظة التغييرات في الحالة الميكانيكية للمنتج المطبوع من ثابت إلى ديناميكي ونتج عن ذلك عصر جديد من الطباعة يتضمن بُعداً جديداً فى الطباعة ثلاثية الأبعاد وهو "الزمن" ، وقد سميت هذه التقنية الجديدة بالطباعة رباعية الأبعاد (4DP).



شكل رقم (١) يوضح الإختلاف بين عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد وعملية الطباعة رباعية الأبعاد.

المرجع : https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/best-articles-about-3d-printing/4d-printing-technology/



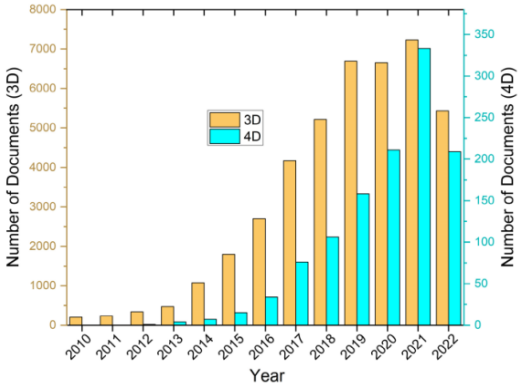
شكل رقم (٢) رسم توضيحى لمراحل الطباعة رباعية الابعاد وتحول المنتج من ثابت إلى ديناميكى.

المرجع : https://www.mdpi.com/2073-4360/11/11/1864

يمكننا القول بطريقة مبسطة أن الطباعة رباعية الأبعاد هى طباعة ثلاثية الأبعاد مع إضافة بعد رابع وهو الزمن مع وجود محفز (Stimuli)،وبعد خطاب Tibbits بدأت الطباعة رباعية الأبعاد تكتسب شعبيتها بين الباحثين والمهندسين والمصممين من مختلف التخصصات، حيث نُشرت أول ورقة بحثية عن الطباعة رباعية الأبعاد فى عام ٢٠١٣(بعد خطاب Tibbits بعام)،ومنذ ذلك الحين،إزداد البحث فى الطباعة رباعية الأبعاد بشكل كبير فى جميع أنحاء العالم،على سبيل المثال،بين عامى ٢٠١٣ و٢٠٢٠ زاد عدد الأبحاث فى 4DP بشكل كبير وفقاً لتقرير الإقتباس الخاص بشبكة العلوم للطباعة رباعية الأبعاد.

[1] مصمم وعالم كمبيوتر أمريكي معروف بعمله في التجميع الذاتي والطباعة رباعية الأبعاد، تخرج من جامعة فيلادلفيا بدرجة البكالوريوس في الهندسة المعمارية وحصل على ماجستير العلوم في علوم الكمبيوتر بالإضافة إلى ماجستير العلوم في التصميم من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. ومن كتبه المنشوره " 4D Printing: Multi-Material Shape Change," Architectural Design ٢٠١٤

[2] هي جامعة بمدينة كامبريدج بولاية ماساتشوستس تأسست عام 1861 ويعتبر من المعاهد المتألقة عالمياً.عمل به العديد من العلماء الكبار؛ مهمته الأساسية هي التعليم والبحث في التطبيقات العملية للعلوم والتقنية، وينقسم إلى خمسة مدارس وكلية واحدة تحتوي على ٣٤ تخصص أكاديمي و٥٣ مختبرًا. لعب دورًا رئيسيًا في هندسة الطب الحيوي وفي تطوير الحواسيب وفي أجهزة الملاحة المستخدمة في القذائف والمركبات الفضائية.وتشتهر هيئة التدريس في المعهد والمكونة من ٩٦٠ عضوًا بالتفوق والامتياز في مجال الأبحاث التقنية المتقدمة وتطبيقاتها، حيث نال ٨٥ منهم جائزة نوبل



شكل رقم (٣) رسم بيانى يوضح الفرق فى عدد الأبحاث المنشوره بالنسبة لكل من الطباعة ثلاثية ورباعية .

المرجع : Ayyaz Mahmood , Tehmina Akram.,Huafu Chen and Shenggui Chen- " On the Evolution of Additive Manufacturing (3D/4D Printing) Technologies: Materials, Applications, and Challenges"- Polymers Journal - Volume 14 - Issue 21 - 2022

وتمت صياغة العديد من التعريفات للطباعة رباعية الأبعاد ولكن التعريف الذى يفسرها بوضوح هو : الطباعة رباعية الأبعاد هى التطور فى الشكل والخصائص والوظيفة لهيكل مطبوع ثلاثى الأبعاد مع مرور الوقت عندما يتعرض لمحفز سواء كان الحرارة ، الضوء ، الماء والرقم الهيدروجينى وغيرها من المحفزات...

٢- الإختلافات بين الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد Differences between 3D Printing and 4D Printing

ستستند مناقشة الاختلافات بين تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد ورباعية الأبعاد من خلال سبعة معايير، وتشمل هذه المعايير مستوى النضج ، وميكانيكا الجسم ، وطباعة التصميم المعقد ، والمواد أو الخامات ، ومنهجية أو ألية التصنيع، والطابعات/البرامج، وخصائص البرمجة.

معايير	الطباعة ثلاثية الأبعاد	الطباعة الرباعية الأبعاد
نضج	ناضجة بما فيه الكفاية (٤ عقود)	غير ناضجة
ميكانيكا الجسم	ثابتة	متحرك
طباعة تصميم معقد	سهل وسريع	صعب الطباعة
مواد	مواد عادية	مواد ذكية
نهج التصنيع	تتم طباعة الأجزاء بتقنية طبقة فوق طبقة	الجزء المطبوع يتعرض لمحفز معين
طابعة / برنامج	طابعة ثلاثية الأبعاد / برنامج	طابعة / برنامج رباعي الأبعاد
خصائص البرمجة	غير مطبق	يجب تطبيق النمذجة الرياضية

الجدول رقم (١) يوضح الإختلافات بين الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد

فيما يتعلق بنضج المجال،تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد أكثر نضجًا وتقدماً من الطباعة رباعية الأبعاد،حيث تم تقديم الطباعة ثلاثية الأبعاد قبل أربعة عقود عام ١٩٨٠،بينما تم تقديم الطباعة رباعية الأبعاد في عام ٢٠١٣. بينما تصنع الطباعة ثلاثية الأبعاد أجسامًا ثابتة، فإن الطباعة رباعية الأبعاد تصنع أجسامًا ديناميكية يمكن تغيير شكلها وصفاتها. وتسمح ميزات الوظيفة الميكانيكية للطباعة رباعية الأبعاد لهذه التقنية ببناء أنماط معقدة؛ تواجه تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد صعوبات في طباعة مثل هذه التصاميم. وفيما يتعلق بالمواد المستخدمة،تعمل تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد مع المواد الشائعة مثل البوليمرات والبلاستيك والسيراميك والمعدن.من ناحية أخرى،تتضمن تقنية الطباعة رباعية الأبعاد استخدام مواد ذكية. يعتمد التصنيع باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد على طباعة المنتج طبقة تلو الأخرى. بالإضافة إلى هذا،فإن تعرضه لمُحفز له تأثير كبير على تكوين منتجات رباعية الأبعاد. لا تحتاج تقنية الطباعة الرباعية الأبعاد إلى أجهزة أو برامج خاصة للعمل. في الواقع،يمكن استخدام الطابعات ثلاثية الأبعاد لتصنيع منتج أو تصميم رباعي الأبعاد.الاختلاف الوحيد هو أن تقنية 4D تستخدم خصائص خاصة قابلة للبرمجة لمادة ذكية لتغيير وظائف معينة للمنتج النهائي المطبوع .الفرق الأساسي بين تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد ورباعية الأبعاد هو المواد المستخدمة فى التصنيع ، حيث يتم تشغيل الانتقال في الحالة الميكانيكية للمادة من ثابت إلى ديناميكي بواسطة مشغل خارجي (محفزات) .

٣- مميزات الطباعة رباعية الأبعاد: Advantages of 4D Printing

على الرغم من أن مزايا تقنية الطباعة رباعية الأبعاد تتشابه مع مزايا الطباعة ثلاثية الأبعاد، إلا أن الطباعة رباعية الأبعاد تتفوق عليها في الحالة الديناميكية للعناصر المنتجة أو المنتج المطبوع النهائى؛ وتشمل المميزات أيضاً توفير الطاقة والمواد والخامات والوقت والتكلفة. بالإضافة إلى ذلك، تعد تقنية الطباعة رباعية الأبعاد مفيدة لتقليل الفاقد والأخطاء، ووصفت دراسات مختلفة عملية الطباعة رباعية الأبعاد بأنها موفرة للطاقة، ومستدامة وسريعة مقارنة بعمليات الإنتاج الأخرى.

٤- عيوب الطباعة رباعية الأبعاد: Disadvantages of 4D Printing

بنفس طريقة مزاياها، قد تنطبق عيوب الطباعة ثلاثية الأبعاد على الطباعة رباعية الأبعاد. نظرًا للخطوات الإضافية المطلوبة لإستيعاب السلوك المتغير ميكانيكيًا للكائنات المطبوعة ، فإن التصميم رباعي الأبعاد أكثر تعقيدًا من التصميم ثلاثي الأبعاد، فالطباعة رباعية الأبعاد باستخدام مواد ذاكرة الشكل لا تزال في مراحلها الأولى ولم تنضج بعد بدرجة كافية. بالإضافة إلى صعوبة ضمان دقتها بسبب التغيرات التى تحدث في أبعاد المنتج المطبوع لتنظيم وظائف الحجم والشكل.

المميزات	العيوب
يوفر الطاقة والمواد والتكلفة والوقت	تعقيد
مستدام	يتطلب برمجة خاصة لضبط الاستجابة
إنتاج سريع	نقص المواد الطباعية
الإستجابة للحافز	خيارات محدودة للمواد

الجدول رقم (٢) يوضح المميزات والعيول الطباعة رباعية الأبعاد

٥- تطبيقات الطباعة رباعية الأبعاد:

تم استخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد على نطاق واسع لمجموعة متنوعة من التطبيقات. فلقد جذبت قدرات هذه التكنولوجيا إهتمام الأكاديميين والشركات والعلماء. تعد الطباعة رباعية الأبعاد تقنية واعدة يمكنها تصنيع الهياكل المطبوعة بتكلفة معقولة وبوقت عمل أقل. سلط عدد من الدراسات الضوء على إمكانات تطبيقات الطباعة رباعية الأبعاد في تخصصات مثل الرعاية الصحية ، والفضاء ، والإلكترونيات ، والغذاء ، والطاقة المتجددة ، والأزياء ، بما في ذلك الأغراض التجارية . تتضمن التطبيقات الأخرى للطباعة رباعية الأبعاد البناء ، والعماره والزراعة والسيارات .....

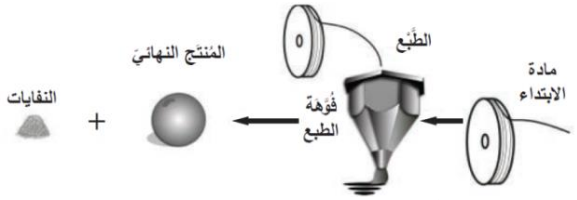
٦- العوامل المسئولة عن الطباعة رباعية الأبعاد:

تعتمد الطباعة رباعية الأبعاد على خمسة عوامل ويجب مراعاتها فى آلية الطباعة وهى :

١- التصنيع المضاف (AM)
٢- المواد الحيوية رباعية الأبعاد (4D Material)
٣- المُحفزات (Stimuli) الكيميائية ، الفيزيائية ، البيولوجية .
٤- آلية التشغيل (Interaction Mechanism).
٥- النمذجة الرياضية (Mathematical Modeling).

(٦-١) التصنيع المضاف (AM) :

التصنيع المضاف Additive Manufacturing (AM) يعرف أيضاً بالتصنيع الإضافى أو التصنيع السريع للنماذج، وهو تكنولوجيا مستخدمة لتصنيع الأجسام المادية عن طريق ترسيب طبقات رقيقة من المواد مثل (السبائك الفلزية، أو أنواع اللدائن البلاستيكية والبوليمرات) بعضها فوق البعض بناء على وصف رقمى مصمم من قبل الحاسوب Computer Numerical Control (CNC)، إن مصطلح التصنيع بالإضافة كان أول إستخدامه للإشارة إلى عملية التصنيع بنفث السائل(Binder Jetting) ، وهى تقنية تم تطويرها فى معهد مساساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) . كما تم إعتماد هذا المصطلح من الجمعية الأمريكية لإختبار المواد American International Society for Testing and Materials المعروفه بـ(ASTM) . ويوجد العديد من تقنيات التصنيع الإضافى مثل الطباعة الحجرية Stereo lithography (SLA)، التلبيد الإنتقائى بالليزر Selective Laser Sintering (SLS)، نمذجة الترسيب بالإنصهار Fusion Deposition (FDM)، الطباعة النفاثة ثلاثية الأبعاد (3DP)، الذوبان الإنتقائى بالليزر (SLM)، الطابعة بالحبر أو الليزر المباشر Direct Ink Writing (DIW)، ذوبان شعاع الإلكترون (EBM)، معالجة الضوء الرقمى (DLP) ، الطباعة بالبثق Extrusion ، تصنيع الخيوط المنصهرة (FFF)، وهذه أيضاً التقنيات المستخدمة فى الطباعة رباعية الأبعاد ، أى يمكن طباعة أى مادة رباعية الأبعاد طالما أن المادة المستخدمة للطباعة متوافقة معها .

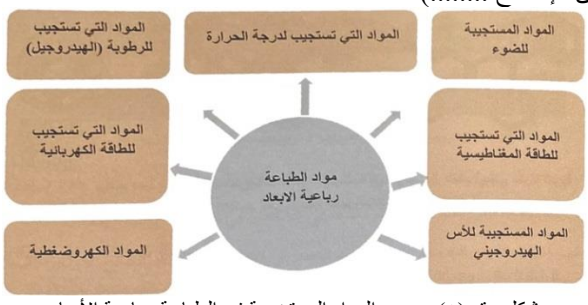


شكل رقم (٤) يوضح طريقة التصنيع بالإضافة
المرجع : https://www.mdpi.com/2073-4360/11/11/1864

(٦-٢) المواد الحيوية رباعية الأبعاد :

نظرًا لأن منهجية الطباعة رباعية الأبعاد تتبع إجراءات مشابهة للطباعة ثلاثية الأبعاد،لا سيما من حيث طريقة التصنيع، فإن الإختلاف في الطباعة رباعية الأبعاد هو إختيار المواد ومدى قابليتها للتفاعلات مع عامل نشط " المحفز". تُعرف المواد الحيوية على أنها نظام أو مادة تحتوى على مستشعرات داخلية تلقائية،تكون قادرة على الإستشعار والإستجابة للحافز الخارجى بطريقة ومدة محددة مسبقاً، بإختصار (الزمن المناسب)،والعودة إلى حالتها الأصلية بمجرد البعد عن الحافز، وهى الأنظمة التى تمتلك وظائف تكنولوجيا مدمجة تتضمن إستجابات بيئية محددة، تعمل إما من خلال تغيير خصائصها المادية الداخلية أو من خلال تبادل الطاقة الخارجية،وهى مواد تحاكى العمليات البيولوجية للنباتات والحيوانات الحية وتظهر أداء محسناً بعد برمجتها وتستجيب لمدخلات (Input) الوسط المحيط الذى يشار إليه بإسم الحافز (Stimulus)وتعطى إستجابة كمخرجات (Output)، وتعرف المواد الحية بأنها مواد تنقسم إلى مواد حية نشطة (Active Material) قادرة على تغيير خواصها المادية عند تعرضها للمحفزات الخارجية أو مواد حية خاملة (Passive Material) مادة إضافية تعزز مادة موجودة دون تغيير خواصها، وهنا ظهرت الحاجة إلى المواد الحية النشطة التى تظهر تغيرات فى الشكل والتكوين نتيجة لإستجابتها للمحفزات المحيطة مثل الرطوبة، الحرارة، الكهرباء ..... وغيرها، وقد تكون الإستجابة بتغير مادة أو أكثر من تلك المواد كما يلى :

- التغيرات فى الشكل (كالإلتواء ، الإنضغاط ، أو التغير فى الأبعاد.....)
- التغيرات الميكانيكية (كالشد ، القص ، الإنحناء .....)
- التغيرات الفيزيائية (بتغير فى واحد أو أكثر من الخصائص كاللون ، الكثافة ، درجة الإنصهار ، نعومة السطح ، الموصلية الكهربائية والحرارية ، السعة الحرارية ، الإنعكاسية ، الشفافية ، تغير فى درجة الحرارة ، تغير فى التيار الكهربائى أو تغير فى المجال المغناطيسى .....)
- التغيرات الكيميائية (تغير فى الخصائص الكيميائية ، تغير فى التركيب الهيكلى للمواد ، تغير مقاومة التآكل أو إنبعاث أنواع معينة من الإشعاع .....)



شكل رقم (٥) يوضح المواد المستخدمة فى الطباعة رباعية الأبعاد
المرجع : Aamir Ahmed, Sandeep Arya, Vinay Gupta b, Hidemitsu Furukawa and Ajit Khosla -"4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges " - Published by Elsevier Ltd - The International Journal for the Science and Technology of Polymers - Volume 228 - 2021

- الطباعة رباعية الأبعاد بإستخدام المواد المستجيبة للمحفزات :

المواد الحية المستجيبة للمحفزات هى النواة الأساسية للطباعة رباعية الأبعاد 4DP ويوجد منها العديد من الأنواع والأشكال التى تستجيب للمحفزات المختلفة كالتالى :

أ- مواد ذاكرة الشكل: هى مواد حية يتغير شكلها إستجابة للمحفزات الخارجية، فهذه المواد لها "ذاكرة" أى لديها القدرة للعودة إلى شكلها

الأصلى بعد أن تم تشكلها بطريقة ما عند تطبيق حافز معين، وتعرف هذه القدرة بإسم تأثير تغير الشكل Shape (SCE) Change Effect، أو تأثير ذاكرة الشكل Shape (SME) Memory Effect .

ب- المواد المستجيبة للرطوبة (الهلاميات المائية) (Hydrogels) : هى مواد تستجيب للمحفزات مثل (الضوء ، درجة الحرارة ، درجة الحموضة ، تركيب المذيبات والمجال الكهربائى) تم إستخدامها مؤخراً فى الطباعة رباعية الأبعاد فهى عبارة عن شبكة مزدوجة من البوليمرات مثل أكريلاميدو ، ميثيل بروبان وحمض السلفونيك (PAMPS) وبولى أكريلاميد (PAM) .

ج- المواد المستجيبة للضوء : يعمل الضوء كمحفز غير مباشر لتغير المواد الحية، حيث تمتص المادة الضوء وينتج عن ذلك ظاهرة التسخين (حرارة) والحرارة تعمل كمحفز لتحول المواد الحية وبذلك يحدث تغيير فى الشكل فى المواد المستجيبة للضوء، هذا هو السبب فى أن الضوء يعمل كمحفز غير مباشر لأنه لايحدث التغيير بشكل مباشر مثل الحرارة والرطوبة .

د- المواد المستجيبة كيميائياً (الإنزيمات) : الإنزيمات هى جزيئات محددة للغاية وإنتقائية تنظم العديد من العمليات البيولوجية بما فى ذلك البروتين وتشكيل الإلتصاقات الخلوية وتقلص العضلات وقد جذب إستخدام المواد المستجيبة للإنزيمات إهتماما كبيرا لوجود مجموعة كبيرة من الإنزيمات بالفعل فى الجسم فهى تحاكى الإنسان حيث يمكن تحفيز الإنزيم جوهريا بواسطة البيئة البيولوجية نفسها ويتم تعديل مستوى التحفيز بشكل طبيعى من خلال حالة الجسم .

ه- المواد التى تستجيب للطاقة المغناطيسية : المجال المغناطيسى أو الطاقة المغناطيسية هو أيضاً محفز غير مباشر يمكن أن يتسبب فى تشكيل وتحول المواد الحية وتلك المواد التى تستخدم لطباعة هيكل رباعى الأبعاد .

و- المواد المستجيبة للأس الهيدروجينى Materials Responsive PH : هى المواد الحيوية التى تخضع لتغييرات فى الشكل والحجم وفقاً لقيمة الأس الهيدروجينى حيث يمكنها إطلاق وقبول بروتونات مع تغيير الأس الهيدروجينى ، والتغير فى الشكل يجعلها مناسبة لتقنية الطباعة رباعية الأبعاد .

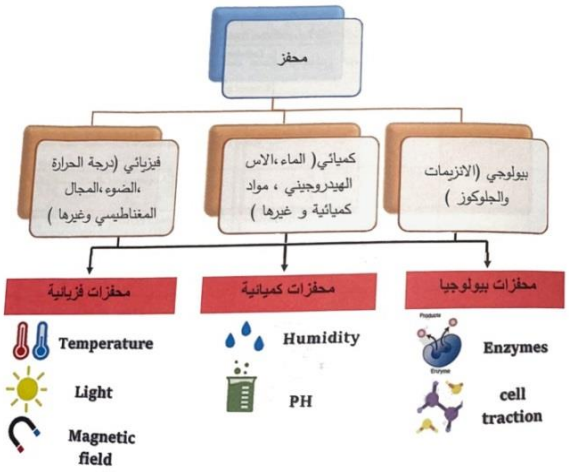
ز- المواد الحية ذات القدرة الإنعكاسية إستجابة للمحفزات المغناطيسية الكهربائية : هى المواد ذات تأثير إنعكاسى إذ تعمل بالإتجاهين وتملك القدرة على التغير تبعاً للمحفز والعودة إلى حالتها الأصلية بعد زوال المؤثر.

ح- المواد الإجهادية الكهربائية أو المواد الكهروضغطية Electrostrictive : هى المواد التى لديها القدرة على توليد شحنة كهربائية داخلية من الضغط الميكانيكى ، وهذا ينتج عنه تأثير كهربائى إنضغاطى عكسى وهو التوليد الداخلى للضغط الميكانيكى إستجابة للمجال الكهربائى ، ويمكن إستخدام ذلك فى تطبيقات الطباعة رباعية الأبعاد حيث يمكن أن يتغير الجسم المطبوع بفعل القوة الميكانيكية الكهروضغطية .

- ويمكن الطباعة رباعية الأبعاد بإستخدام مادة واحدة أو مواد متعددة وهو عبارة عن مزيج من البوليمرات المختلفة التى لها أشكال هندسية الأبعاد ، وتعد طباعة مواد متعددة مهمة صعبة للغاية ولايتوفر سوى عدد قليل من الطابعات التى يمكنها طباعة هذه المواد المتعددة وهى الطابعات النافثة للحبر (Ink-Jet Printers) والطابعات بالحبر المباشر (DIW) .

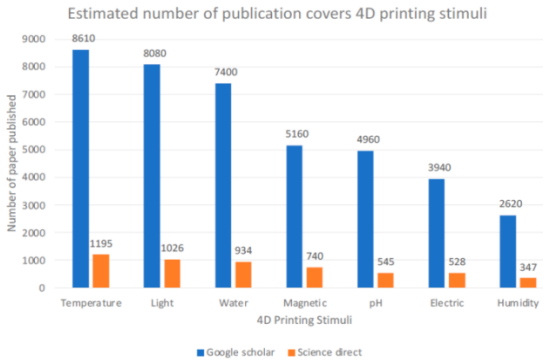
(٦-٣) المحفزات (Stimuli):

المحفزات هى التى يتم إستخدامها فى تغيير شكل ووظيفة الهياكل المطبوعة وفقاً لمحفز واحد أو أكثر ، حيث يتم الإنتقال للمنتج والتصميم المطبوع من ثابت كما فى الطباعة ثلاثية الأبعاد إلى ديناميكي فى الطباعة رباعية الأبعاد بواسطة مشغل خارجي (محفزات)، يمكن أن تكون المحفزات المستخدمة فيزيائية أوكيميائية أوبيولوجية . والمحفزات الفيزيائية مثل الضوء والرطوبة والطاقة المغناطيسية والكهربائية ودرجة الحرارة وضوء الأشعة فوق البنفسجية وغيرها ... ، والمحفزات الكيميائية مثل المواد الكيميائية ، مستوى الأس الهيدروجينى PH وإستخدام المؤكسد والمختزل ، والمحفزات البيولوجية مثل الإنزيمات والجلوكوز.



شكل رقم (٦) يوضح أنواع المحفزات فى الطباعة رباعية الأبعاد
المرجع : مارينا محروس عبد المسيح توفيق – "تفاعل المبنى مع الظروف البيئية المحيطة بإستخدام تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد" – رسالة ماجستير – قسم العمارة – كلية الهندسة – جامعة القاهرة – ٢٠٢٣.

و بناءً على عدد من الأبحاث، فإن المُحفزات الأكثر بحثًا هي كما يلي ، بترتيب تنازلي: درجة الحرارة ، والضوء، والماء ، والمغناطيسية ، ودرجة الحموضة ، والكهرباء ، والرطوبة.



شكل رقم (٧) رسم بيانى يوضح عدد الأبحاث المنشوره والتى تناولت محفزات الطباعة رباعية الأبعاد من قواعد بيانات Google Scholar و Science Direct
المرجع : Faisal Khaled Aldawood – " A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges " – actuators journal - Volume 12 - Issue 3 – 2023.

- درجة الحرارة : هي الحافز الأكثر شيوعًا الذي تم إستخدامه فى الطباعة رباعية الأبعاد . نظرًا لقدراتها ، تتمثل إحدى ميزات إستخدام درجة الحرارة كمحفز في القدرة على التحكم في الضبط في جسم مصطنع ، والقدرة على إجراء معالجات ميكانيكية ، وسهولة التشغيل، وإمكانية حدوث تغيرات فى الجسم المطبوع، ركزت

غالبية الدراسات التجريبية على إستخدام درجة الحرارة كمحفز خارجي لتوليد أجزاء مطبوعة بيولوجية متغيرة الشكل .

- الضوء : هو ثاني أكثر المحفزات شيوعًا ، وهو يجذب المزيد من الباحثين . تشمل مزايا استخدام الضوء كمحفز، على سبيل المثال لا الحصر، التغيير السريع ، والتوافق الحيوي ، والمصدر المستدام ، والتحكم اللاسلكي والتحكم عن بعد ، وتعديل اللون ، والتحكم في الخواص الميكانيكية. على الرغم من أن الضوء مصدر ممتاز لتعديل بنية الكائنات المطبوعة رباعية الأبعاد ، إلا أن له بعض العيوب ، بما في ذلك السمية المحتملة ، وتقلص تحول الشكل ، وتوليد الحرارة ، والتعقيد.

- الماء : إستخدمت العديد من الدراسات الماء كمُحفز لتحفيز الأجسام رباعية الأبعاد. تتمثل مزايا إستخدام الماء للتشويه في الكائنات المطبوعة رباعية الأبعاد في إمكانية التحكم فيه، وملائمته، ولديه القدرة على خفض درجة الحرارة. وله بعض العيوب، بما في ذلك وقت رد الفعل البطيء ويصعب التحكم في المواد الحساسة للرطوبة.

- المغناطيسية : هي نوع آخر من المحفزات التي تم استخدامها في دراسات مختلفة ، إستخدام المجالات المغناطيسية كمشغل له العديد من المزايا ، بما في ذلك الإستجابة السريعة ، وإنخفاض مخاطر السلامة ، والتوجيه عن بعد والقدرة على زيادة سرعة تغيير الأجسام 4D . ومع ذلك ، فإن المجال المغناطيسي كمُحفز له أيضًا القيود التالية: الطبيعة شديدة التفاعل ، والمضاعفات مع الجسيمات النانوية المغناطيسية في الأنظمة الحية، ودرجة حرارة الاستخدام المنخفضة ، وإرتفاع كثافة الماصات المغناطيسية التقليدية . في ظل ظروف معينة ، قد يتسبب المجال المغناطيسي في إرتفاع درجة الحرارة أثناء التجربة.

- الأس الهيدروجيني PH : في الكيمياء ، يرمز "pH" إلى "قوة الهيدروجين" أو "إمكانات الهيدروجين" ، وهو مصدر جيد لتحفيز كائن مطبوع رباعي الأبعاد نظرًا لقدرته على التسبب في التورم أو الانكماش أو التفكك أو التدهور. يمكن أن ينشط الأس الهيدروجيني أيضًا وظائف التمدد والإنكماش والإلتواء. علاوة على ذلك ، يسمح الأس الهيدروجيني بتحسينات في الإستجابات، وتغييرات اللون، والتحلل البيولوجي، والتوافق الحيوي. بسبب قابليتها للتحلل البيولوجي والتوافق الحيوي.

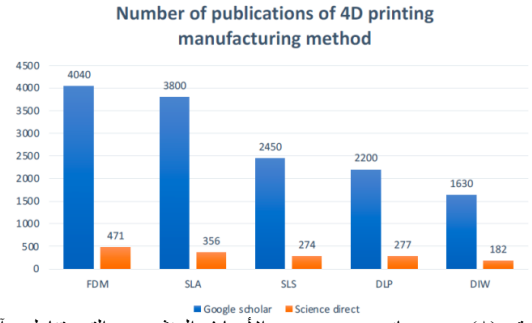
- المجال الكهربي : هناك نوع آخر من المحفزات تم بحثه في دراسات مختلفة وهو المجالات الكهربائية ، والتي تظهر قدرات مثل السرعة العالية والتحكم عن بعد. وبعض المضاعفات المحتملة المرتبطة بإستخدام مجال كهربائي كمصدر للتحفيز هي التسخين الموضعي ، أو تمزق الغشاء ، أو موت الخلايا .

- الرطوبه : بناءً على عدد الدراسات ، فإن أقل الحافز شيوعًا هو الرطوبة . تم تحليل الرطوبة سابقًا في بعض الدراسات نظرًا لقدرتها على أداء التورم أو الإنكماش ، الإلتواء ، الإنحناء ، والتوسع. فوائد استخدام الرطوبة كمحرك هي تكلفتها المنخفضة وطبيعتها غير الضارة . علاوة على ذلك ، تم إستخدام منبهات الرطوبة في تطبيقات مثل أجهزة الإستشعار . ومع ذلك ، هناك العديد من العوائق التي تحول دون استخدام الرطوبة كمحفز في تقنية الطباعة رباعية الأبعاد ، بما في ذلك وقت الإستجابة البطيء والحاجة إلى التحكم الدقيق لضمان سلامة الهيكل .

-و تشمل المحفزات الأخرى التي تم فحصها للأشياء المطبوعة رباعية الأبعاد ، على سبيل المثال لا الحصر ، الموجات الدقيقة، والإنزيمات، والجلوكوز، والإجهاد . تقتصر غالبية الدراسات المتعلقة بتكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد على التحقيق في حافز واحد؛ ومع ذلك ، فقد إكتشف بعض الباحثين الإستجابة للمحفزات المتعددة .

(٦- ٤ ، ٥) آلية التشغيل و النمذجة الرياضية :

العاملان الرابع والخامس هما آلية التشغيل والنمذجة الرياضية،عندما يتم تطبيق حافز على مادة حية نرى أن ليست جميع المواد تخضع للتحول المطلوب،وهذا يتطلب توفير آلية تفاعل مثل التحميل الميكانيكى أو آلية المعالجة الفيزيائية التى ستعمل بشكل دقيق ومخطط لتسلسل تغيير الشكل، وذلك أيضًا يتطلب توفير آلية التفاعل وتوفير النمذجة الرياضية المطلوبة، حيث يعتمد تطوير عملية الطباعة رباعية الأبعاد على النمذجة الرياضية المناسبة.فى الواقع الرياضيات ضرورية فى الطباعة رباعية الأبعاد لأنك بحاجة للتنبؤ بتطور الشكل بعد الطباعة بمرور الوقت، كما يمكن التنبؤ بهيكل مادة معين وخصائص المادة وخصائص التحفيز،وبالتالى يمكن تقليل عدد تجارب الإختبار بشكل كبير،ومن هنا يمكن تلخيص الطباعة رباعية الأبعاد على أنها " يتم تطبيق التحفيز على المادة الحية بإستخدام آلية تفاعل مناسبة ونمذجة رياضية أثناء عملية التصنيع المضاف (AM) والتى ينتج عنها بنية مطبوعة رباعية الأبعاد " .



شكل رقم (٨) رسم بيانى يوضح عدد الأبحاث المنشوره والتى تناولت آليات التشغيل بالطباعة رباعية الأبعاد من قواعد بيانات Google Scholar و Science Direct

المرجع : Faisal Khaled Aldawood – " A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges " – actuators journal - Volume 12 - Issue 3 – 2023.

- طريقة التصنيع الأكثر شيوعًا لتصنيع منتج مطبوع رباعي الأبعاد هي نمذجة الترسيب المنصهر (FDM). وطبقا للدراسات تم إستخدام تقنية FDM مع مجموعة متنوعة من المُحفزات مثل درجة الحرارة ، ودرجة الحموضة، والضوء ، والماء.هذه الطريقة غير مكلفة نسبيًا ، وتنتج منتجات عالية الجودة وعالية الدقة ، وتتضمن عملية طباعة سريعة، ويمكن الوصول إليها بسهولة .على الرغم من أن FDM كان مقصورًا في الأصل على مواد البوليمر الحرارية للطباعة ،فقد وسعت الدراسات FDM إلى البوليمرات المركبة للحصول على نتائج أفضل.بعض القيود على FDM هي التعقيد العالي ، الهشاشة،سرعة الطباعة المنخفضة،والتشطيب السطحي الخشن ؛بالإضافة إلى أنها تهدر مواد أكثر من الطرق الأخرى.

- الطباعة الحجرية المجسمة (SLA) هي طريقة أخرى تم إستخدامها لتصنيع كائنات مطبوعة رباعية الأبعاد. تشمل مزايا استخدام طريقة SLA سرعتها العالية ، والتطور، وإنهاء السطح الأملس، والدقة العالية . على الرغم من أن SLA قادرة على طباعة الأجزاء بإستخدام مواد البوليمر، فإن الأجزاء النهائية لها خصائص ميكانيكية منخفضة. بالإضافة إلى ذلك ، تتطلب معالجة لاحقة.

- يتيح التلبيد الانتقائي بالليزر SLS تصنيع المكونات دون الحاجة إلى مواد الدعم.بالإضافة إلى ذلك، تتميز هذه التقنية بحجم إنتاج مرتفع وسرعة معالجة عالية.على الرغم من أنها قادرة على الطباعة بمجموعة متنوعة من المواد،إلا أنها تفتقر إلى المواد المناسبة لطباعة الأجزاء رباعية الأبعاد.تشمل عيوب هذا النهج المخاطر الصحية والتكلفة العالية،إلى جانب ضعف دقة السطح والأبعاد
- تم إستخدام طريقة تصنيع المعالجة الرقمية للضوء DLP لتصنيع مطبوع رباعي الأبعاد.تقدم هذه التقنية المزايا التالية: أوقات الإنتاج السريع، دقة عالية الجودة،وهياكل معقدة. DLP مقيدة بخيارات المواد وإرتفاع تكاليف المواد والخصائص الميكانيكية الرديئة.
- تتميز الطباعة بالحبر المباشر (DIW) بدقة أبعاد أقل للأجزاء المطبوعة عند مقارنتها بتقنيات الطباعة الأخرى مثل SLA. علاوة على ذلك ، فإن تأثير الطباعة على دقة الأبعاد والخشونة غير واضح إلى حد كبير بسبب عدم كفاية الدراسات المتعلقة بـ DIW ، تقدم طباعة DIW 4D مجموعة متنوعة من المواد بتكلفة منخفضة ، كما أن عملية DIW بها حد أدنى من هدر المواد للأجزاء المطبوعة. يستخدم DIW في مجموعة واسعة من الحالات المادية ، بما في ذلك الحالات الصلبة والسائلة والغازية.

٧ ـ العوامل المسئولة على الطباعة رباعية الأبعاد:

تمت دراسة الطباعة رباعية الأبعاد بعد ظهورها لتكون لها تطبيقات مختلفة فى مجالات مختلفة من البحث والتكنولوجيا، وفتحت أيضاً جوانب مختلفة للتحول فى الهياكل والأجهزة المطبوعة،حيث يمكننا إنتاج الهياكل المعقدة مباشرة من طابعة ثلاثية الأبعاد أو يمكننا أولاً إنتاج هياكل ثلاثية الأبعاد بسيطة ثم تجميعها لإنتاج بنية معقدة شاملة،ولقد جعلت الطباعة رباعية الأبعاد ببساطة الطباعة ديناميكية حيث يكون للباحثين خيار إختيار طرق ومواد مختلفة وفقاً للمتطلبات،عندما ننظر بعمق فى هذه الهياكل المطبوعة رباعية الأبعاد، نجد أن لديها القدرة على التجميع الذاتى،و التكيف الذاتى،و الإصلاح الذاتى.
أ- التجميع الذاتى : هو قدرة المادة الحية على تجميع الهياكل الفردية ثلاثية الأبعاد المطبوعة ، ومن ثم تصبح بنية رباعية الأبعاد معقدة الشكل ومن هنا يمكن أن تكون قدرة المواد المطبوعة رباعية الأبعاد مفيدة للغاية عند إستخدامها فى ظروف بيئية قاسية مثل الفضاء . ويمكن إستخدام هذه المواد المطبوعة رباعية الأبعاد للنقل إلى المحطات الفضائية ، أيضاً يمكن إستخدام هذه القدرة فى بناء الأقمار الصناعية والهوائيات، أى يمكن لأجزائها التجميع الذاتى فى الفضاء.

شكل رقم (٩) يوضح نموذج من الهلاميات المائية مطبوع تم وضعه فى حوض من الماء فيعطى سلوك شبيه بالروبوتات دون الإعتماد على الأجهزة الكهروميكانيكية المعقدة .
المرجع :
https://www.arch2o.com/?_ga=2.57704876.768664595.170185
2474-1159552026.170185247

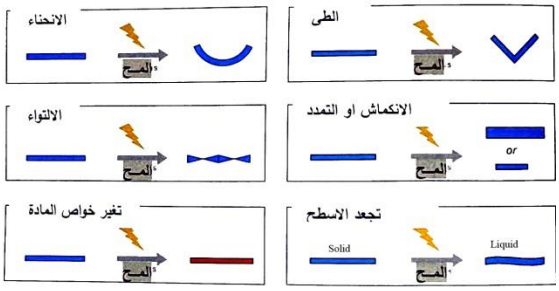
ب- القدرة على التكيف الذاتى : بعض المواد كما تمت مناقشته سابقا تغير شكلها وهيكلها عند التبريد والتسخين، قد ينظر إلى هذا على أنه قدرتهم الذاتية على التكيف وفقاً للمحفز . يمكن أن تثبت خاصية المواد المطبوعة رباعية الأبعاد هذه أنها مفيدة جداً فى تصميم الأجهزة والأنسجة الطبية التى يجب أن تكون ذاتية التكيف .

شكل رقم (١٠) يوضح سلاسل من البوليمر ذاتية التكيف مع جميع المتغيرات.
المرجع :
https://www.arch2o.com/?_ga=2.57704876.768664595.170185
2474-1159552026.170185247

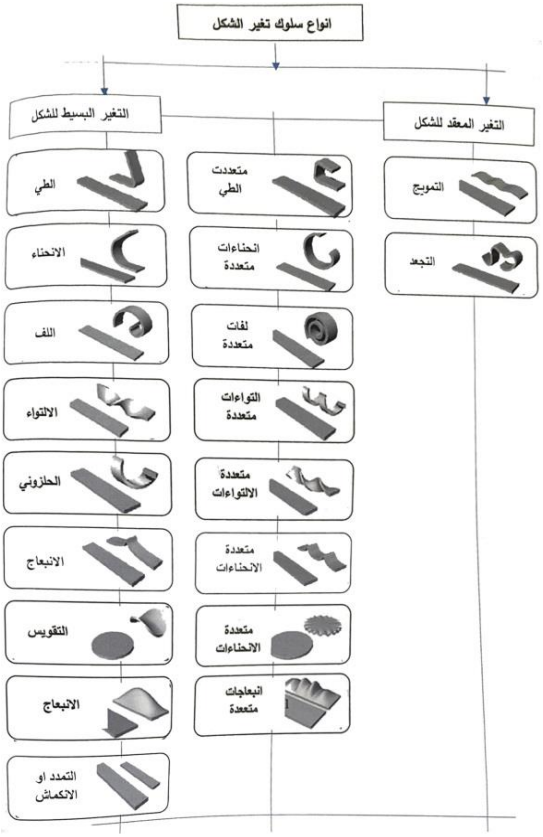
ج – الإصلاح الذاتى : تصحيح الأخطاء والعيوب من تلقاء نفسه هو ملكية فريدة من نوعها تمتلكها مواد الطباعة رباعية الأبعاد التى يمكن أن تكون مفيدة للغاية فى مختلف التطبيقات ، هذه يطلق عليه إسم الإصلاح الذاتى ، على سبيل المثال التطبيقات التى نحتاج فيها إالى الإصلاح الذاتى (الأنابيب) وإعادة التدوير وما إلى ذلك يمكن أن تكون المواد المطبوعة متعددة الأبعاد ذاتية الإصلاح مفيدة للغاية.

شكل رقم (١١) سلاسل من البوليمر ذاتية الإصلاح عند تعرضها لمحفز خارجى
المرجع :
https://www.arch2o.com/?_ga=2.57704876.768664595.170185
2474-1159552026.170185247

- سلوكيات تغير المواد الحيوية و المنتج المطبوع فى الطباعة رباعية الأبعاد : تشمل الطى ، الإنحناء ، التضخم ، الإلتواء ، التمدد أو الإنكماش ، تجعد السطح ، تغير السمات الطبوغرافية للسطح ، حيث يمكن تحول الأشكال من 1D إلى 1D ، 1D إلى 2D ، 2D إلى 2D ، 1D إلى 3D ، 2D إلى 3D ، 3D إلى 3D ،..... وتجدر الإشارة إلى أن الهيكل الذى يظهر تحول فى الشكل من 1D إلى 1D بمرور الوقت يعتبر أيضا بنية مطبوعة رباعية الأبعاد ، هذا لأن هذه البنية تتم طباعتها فى البداية ثلاثية الأبعاد تم تتطور بمرور الوقت .



شكل رقم (١٢) يوضح أشكال تحول المواد الحيوية المطبوعة عند تعرضها إلى المحفزات الخارجية
المرجع https://www.connectionsbyfinsa.com/?s=smart+materials



شكل رقم (١٣) يوضح تصنيف السلوكيات المتغيرة للشكل الرباعى الأبعاد للمواد المطبوعة .

المرجع https://www.connectionsbyfinsa.com/?s=smart+materials

٨- الطباعة رباعية الأبعاد كتقنية قائمة على التقليد الحيوى :

قام العديد من العلماء بدمج تصميم المحاكاة الحيوية فى التعليم المعمارى لتلبية تلك الكفاءات خاصة لتعزيز الإبداع وحل المشكلات المعقدة ، والعديد من الدراسات تبنت محاكاة الطبيعة فى التصميم ، وخاصة فى تعليم التصميم المعمارى حيث نجحت تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد فى محاكاة الكثير من المفاهيم البيولوجيا للنباتات والكائنات الحية من الطبيعة ، فالطباعة رباعية الأبعاد طريقة لإدراك أساسيات التقليد الحيوى (الهيكل والشكل والسلوك) ، فالطبيعة مصدر غنى بالأفكار نستلهم منها الحلول لمشاكل التصميم ، وكثيراً من الأشكال المعمارية إعتمدت فى تكوينها على التعلم والإستفادة من التكوينات الطبيعية ، والتعلم من الطبيعة موجود منذ خلق الإنسان .

وتتشارك جميع الكائنات الحية فى العديد من الخصائص أو الوظائف الرئيسية منها الإستشعار والإستجابة (Sensing and Reacting) ، توجية إستخدام الطاقة (Use of Energy) ، معالجة المعلومات (Information Processing) ، وفى ذلك تتشابه الكثير من التصميمات المطبوعة رباعية الأبعاد .

(٨-١) علم المحاكاة الحيوية :

لاحظ البشر الطبيعة منذ فجر التاريخ وطبقوا دروسها ، إنتشرت فى منتصف القرن العشرين الفكرة القائلة بأن التكنولوجيات الجديدة يمكن أن تستفيد من المعرفة البيولوجية فى المجتمع العلمى وبدأت كمجال متميز من البحث والتطبيق . (محاكاة الطبيعة البيولوجية = Biomimicry الحياة = Bio ، المحاكاة = Mimicry التقليد Imitate المحاكاة Mimesis) ، محاكاة الطبيعة Bio mimicry هو جزء من الإتجاه العام للتقارب بين البيولوجيا والهندسة ، أصبح هذا التقارب مصدراً للإبتكار فى القرن الحادى والعشرين ، ويوفر فرص لنقل المعرفة المتبادلة وظهور محتم لنموذج جديد من المعرفة ، وكذلك نقل المواد الفعلية بين المجالات ، تتصل العديد من التخصصات مع المجال البيولوجى وعلوم الحياة ، فمن المفيد تعريف المصطلحات ذات الصلة والمستخدمة بشكل شائع ، حيث يتم إستخدام العديد من المصطلحات بشكل متبادل للتصميم المستوحى من الحياة البيولوجيا.

Biomimetics:دراسة تكوين هيكل أو وظيفة المواد المنتجة بيولوجياً مثل الإنزيمات أو الحرير والأليات والعمليات البيولوجية مثل تخليق البروتين أو التركيب الضوئى على وجه التحديد لغرض تركيب منتجات مماثلة بواسطة آليات إصطناعية تحاكى الطبيعة.

Biomimesis, Biomimicry, Biognosis, Bioinspiration, Biomimetic Design, Biologically Inspired Design : كل هذه المصطلحات مترادفات للمصطلح Biomimetics ليعنى محاكاة النماذج الطبيعية والأنظمة والعمليات لحل المشاكل البشرية .

Bioengineering, Biological Engineering, Biotechnical Engineering : تطبيق المبادئ والأدوات الهندسية على سبيل المثال الفيزياء والرياضيات والتحليل والتركيب لحل المشاكل فى علوم الحياة ، وقد تنطوى على دمج النظم البيولوجية والهندسية .

Biomechanics : تطبيق المبادئ الميكانيكية على سبيل المثال الميكانيكا لدراسة نموذج وهيكل ووظائف النظم البيولوجية .

ظهر مصطلح بيوميميكرى Biomimicry فى عام ١٩٨٢م ، وكان شائعاً بواسطة عالمة الأحياء والمؤلفة جانين بنيوس Janine Benyus وفى كتابها عام ١٩٩٧م Biomimicry Innovation Inspired By Nature عرفت محاكاة الطبيعة على أنها علم جديد يدرس نماذج الطبيعة ومن ثم يقلد أو يأخذ الإلهام من هذه التصاميم والعمليات لحل مشاكل الإنسان ، وإقترحت التطلع إلى الطبيعة على أنها "نموذج ومقياس ومعلم" وتؤكد أن الإستدامة تعتبر هدف من محاكاة الطبيعة ، يتم التشجيع حالياً على مجال تقليد الطبيعة من خلال مؤسستين هما نقابة المحاكاة البيولوجية Biomimicry Guild ومعهد المحاكاة البيولوجية Biomimicry Institute تعد النقابة هى شركة الإبتكار الوحيدة فى العالم التى تستخدم المعرفة العميقة للتكيفات البيولوجية لمساعدة المصممين والمهندسين والمعماريين وقادة الأعمال على حل تحديات التصميم والهندسة على نحو مستدام ، يشجع المعهد على التعلم من الأشكال الطبيعية والعمليات والنظم البيئية ومن ثم محاكاتها لإنشاء تقنيات وتصميمات بشرية أكثر إستدامة . وينشر كل عام أوراق بحثية خاصة بمحاكاة الطبيعة وهى فى تزايد مستمر ، ومعظم نشاط النشر فى مجال المحاكاة البيولوجية يأتى من التخصصات البحثية فى الهندسة البيولوجية والهندسة الكيميائية والهندسة الفيزيائية والهندسة المعمارية ، كل هذا يساعد القدرة البشرية على فهم ومحاكاة الطبيعة بطرق أكثر وضوحاً ، يتم تعريف المحاكاة البيولوجية فى الوقت الحاضر بأنها " تقليد الأساس الوظيفى لأشكال العمليات والأنظمة البيولوجية لإنتاج حلول مستدامة " . لذا فإن تقليد الطبيعة هو المبدأ التوجيهى المقترح ليكون نقلة نوعية للتعلم الإبداعى القائم على حل المشكلات الضرورى للتصميم .

(٨-٢) مستويات المحاكاة البيولوجية :

توضح الدراسات أن محاكاة أى كائن حى على سبيل المثال هى محاكاة جانب معين فى هذا الكائن ، هذا الجانب قد يكون شكل الكائن الحى أو الطريقة التى ينجز بها الكائن الحى وظيفة ، ويشار إلى الجانب الذى تتم محاكاته ب " مستوى المحاكاة البيولوجيا " ، ولقد تم تصنيف مستويات المحاكاة البيولوجية من خلال دراسة تقنيات المحاكاة البيولوجية الموجودة إلى ثلاث مستويات من المحاكاة وهى:

- مستوى الكائن الحى : يشير هذا المستوى إلى تقليد كائن معين كالنبات أو الحيوان من حيث (الشكل أو مواد البناء أو كيفية البناء إنشائياً أو نفس العملية التى تقوم بالطبيعة أو أن التصميم قادر على القيام بنفس الوظيفة).

- مستوى السلوك : هذا المستوى يحاكى سلوك الكائنات الحية فتعتمد على الوظائف وعلاقات الربط من حيث (الشكل ، مواد البناء ، الإسلوب الإنشائى ، الوظيفة) .

- مستوى النظام البيئى : يشير إلى محاكاة نظام إيكولوجى معين وكيفية عمله بنجاح وكذلك العناصر والمبادئ المطلوبة لتشغيله بنجاح ، كما تم إستخدام مصطلح Eco Mimicry لوصف محاكاة النظم البيئية فى التصميم .

و داخل كل مستوى من هذه المستويات خمسة أبعاد ممكنه للتقليد ، فديكون التصميم المحاكى للطبيعة على سبيل المثال من حيث (الشكل) ، من ماذا يصنع (المادة) ، كيف يتم ذلك (الهيكل) ، وكيف يعمل (العملية) ، أو مايستطيع القيام به (الوظيفة) .

شكل رقم (١٤) يوضح مستويات محاكاة الطبيعة

٩- تحليل لبعض أعمال عمارة تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد :

يحاول العديد من الباحثين والمطورين إيجاد تكاملاً بين أنظمة المبانى والبيئة الخارجية حتى يحدث إنسجاماً بين كافة أطراف المنظومة الداخلية والخارجية معاً ، ومن هنا وجدنا أن تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد تستطيع أن تقوم بهذا الدور لأن لديها إمكانيات دمج المواد الحية النشطة بمحتوى الذاكرة الخاص بالطباعة التى تم سردها سابقاً لتحسين العديد من البدائل المعمارية .

(٩-١) الجناح الحساس للأرصاد الجوية – HygroSkin Meteorosensitive Pavilion:

مشروع HygroSkin – Meteorosensitive Pavilion ، للمعماري أوليفر ديفيد كريج Oliver David Krieg و أكيم مينجس Achim Menges و ستيفن ريتشارد Steffen Reichert ، بفرنسا ، ٢٠١٣ .

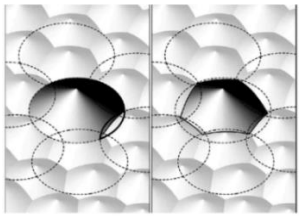
شكل رقم (١٥) مجموعة صورتوضح جناح مشروع HygroSkin ذو الواجهة النشطة الخالية من الطاقة .

المرجع : https://oliverdavidkrieg.com/?p=675

يعتمد هذا المشروع على أكثر من ست سنوات من الخبرة البحثية التصميمية التى تحقق مبادئ المحاكاة الحيوية لنبات الصنوبر المخروطى لتحقيق أنظمة معمارية تستجيب للمناخ ، والتى لاتتطلب أى معدات حسية أو وظائف حركية أو حتى مدخلات طاقة تشغيلية ، ويكشف مشروع HygroSkin طريقة جديدة للهندسة المستجيبة للمناخ على أساس المواد الحية المستخدمة والعلاقات المتبادلة والتكوين الحسابى والتصنيع الآلى ، حيث يتم إستخدامه لتطوير أغلفة معمارية حساسة للأرصاد الجوية والتى تنفتح وتنغلق إستجابة لتلك التغيرات المناخية دون الحاجة إلى أى معدات فنية أو إمداد بالطاقة الخارجية ، بإستخدام مكونات هيكلية خفيفة الوزن مصنوعة من ألواح الخشب الرقائقى بشكل مرن،ويتم ضبط الفتحات المستجيبة من الخشب المركب المسامى للتغيرات فى الرطوبة النسبية المحيطة،يحتوى الجناح على مجموعة من الفتحات المستجيبة للمناخ،ويجسد السطح المتغير القدرة على الإحساس والتحفيز والتفاعل،كل ذلك داخل المادة نفسها،والغلاف الخارجى للجناح هو فى نفس الوقت بنية حاملة وجلد حساس للمبنى مشتق من الناحية الحسابية من سلوك الإنحناء المرن لألواح الخشب الرقيقة، حيث يتم إستخدام القدرة الكامنة فى المادة لتشكيل الأسطح المخروطية جنباً إلى جنب مع عمليات التصنيع ثلاثية الأبعاد ذات ٧ محاور لبناء ٢٨ مكوناً هندسياً فريداً يضم ١١٠٠ فتحة مستجيبة للضوء.

شكل رقم (١٦) يوضح أشكال الفتحات المستجيبة للرطوبة من الداخل

المرجع : https://www.designboom.com/architecture/hygroskin-a-climate-responsive-kinetic-sculpture/

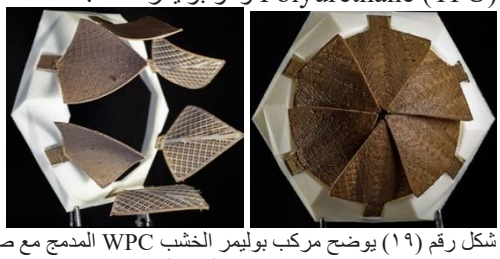


شكل رقم (١٧) منحنيات التقاطع لفتحات الجناح بعد عمليات الطباعة
المرجع : https://www.designboom.com/architecture/hygroskin-a-climate-responsive-kinetic-sculpture/

ـ نبات الصنوبر المخروطى Pinecone : يتغير حجم وشكل نبات الصنوبر ، حيث ينحنى (تنطوى أوراقه) حامل بذور مخروط الصنوبر إستجابة للتغيرات فى الرطوبة النسبية من خلال طبقتين (تتكون الطبقة الداخلية للقشور من ألياف صلبة والطبقة الخارجية من الخلايا الحجرية) ، تفتح قشور الصنوبر عندما تكون جافة ، وتطلق بذورها ، وتغلق القشور عندما تكون رطبة .تكون الألية سلبية حيث هيكل القشور وجدران الخلايا المكونه للقشور تستجيب لتغير الرطوبة النسبية،يبدو أن آلية الإنحناء تعتمد على الطريقة التى يتحكم الميكروفيلوز السليلوز فى التمدد الرطب للخلايا فى الطبقتين.

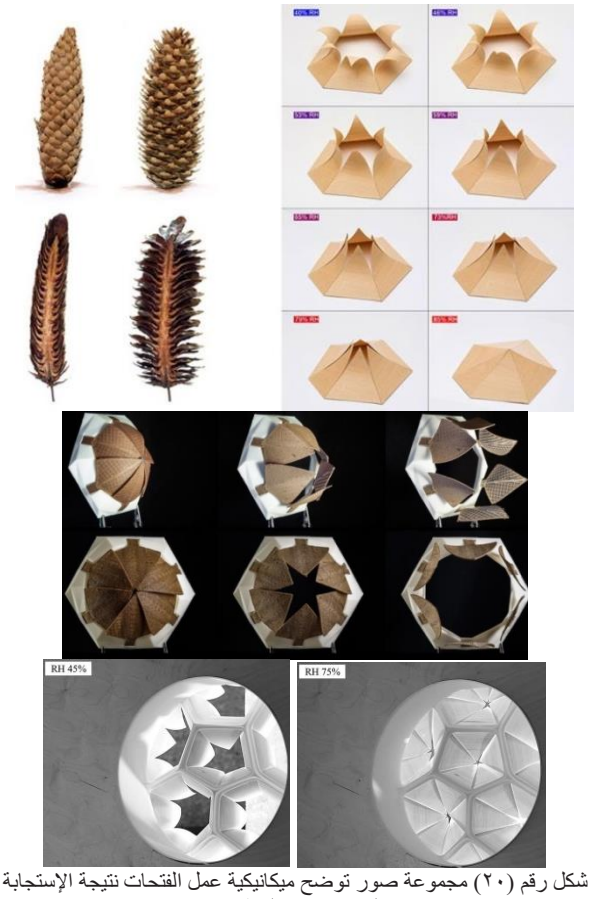
شكل رقم (١٨) يوضح نبات الصنوبر وتفاعله مع التغيرات فى مستوى الرطوبة .

ـ فكرة المشروع : طباعة رباعية الأبعاد لنموذج وظيفى مستوحى من نبات الصنوبر المخروطى ، حيث تمكن المعماريون من إستكشاف الخصائص الجوهرية للخشب حيث قاموا بتسخير خاصية إسترطاب الخشب لتشكيل مركب مستجيب للرطوبة، من خلال إستخدام الطابعة ثلاثية الأبعاد Fused Filament Fabrication (FFF) لتصنيع جزء مستجيب للرطوبة بواسطة المواد الحية النشطة ، المادة الأولى عبارة عن مركب بوليمر خشبى Wood Polymer Composite (WPC) يتكون من حشو ليفى من ألياف مشتقة من الخشب (٤٠٪) مدمجة مع مصفوفة بوليمر بوليستر مشترك، كما هو موضح من قبل الشركة المصنعه، يحاكى WPC خصائص الطبقة الصلبة السفلية المنتفخة، أى الطبقة المشغلة للرطوبة لمقياس بذور الصنوبر الطبيعى، المادة الثانية هى أكريلونيتريل بوتادين يتايرين Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)، وهو بوليمر طباعة ثلاثى الأبعاد شائع يعمل كطبقة علوية أكثر صلابة وأقل إنتفاخاً وتعتبر أيضاً بمثابة طبقة مقاومة، المادة الثالثة البولى يورثين الحرارى Thermoplastic Polyurethane (TPU) وهو بوليمر نشط .



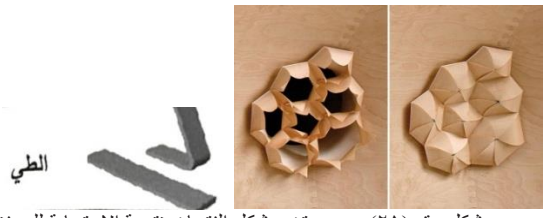
شكل رقم (١٩) يوضح مركب بوليمر الخشب WPC المدمج مع صفوف البوليستر المشترك
المرجع : https://www.archdaily.com/966556/have-you-heard-of-4d-printing-bridging-additive-manufacturing-with-smart-materials#

ـ المحاكاة الحيوية : من خلال الإستشعار والإستجابة من خلال محاكاة نبات الصنوبر المخروطى .
ـ العنصر التصميمى:من خلال الفتحات وغلاف الجناح المستجيب للرطوبة
ـ المواد الحيوية رباعية الأبعاد : مركب بوليمر خشبى Wood Polymer Composite (WPC) ، أكريلونيتريل بوتادين يتايرين Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ، البولى يورثين الحرارى Thermoplastic Polyurethane (TPU) .
ـ المحفز : الرطوبة حيث التغير فى الرطوبة النسبية المحيطة من ٤٥ % إلى ٧٥ % ، وهو ما يتوافق مع الظروف المناخية المعتدلة النموذجية فى فرنسا .



شكل رقم (٢٠) مجموعة صور توضح ميكانيكية عمل الفتحات نتيجة الإستجابة لمحفز (نسبة الرطوبة)
المرجع : https://www.archdaily.com/966556/have-you-heard-of-4d-printing-bridging-additive-manufacturing-with-smart-materials#

ـ سلوك تغير الشكل : الطى Folding

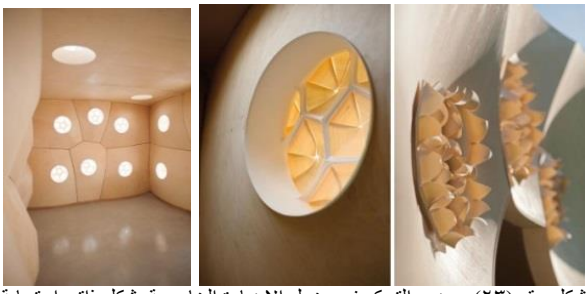


شكل رقم (٢١) يوضح تغير شكل الفتحات نتيجة الإستجابة للمحفز.
المرجع : https://oliverdavidkrieg.com/?p=675

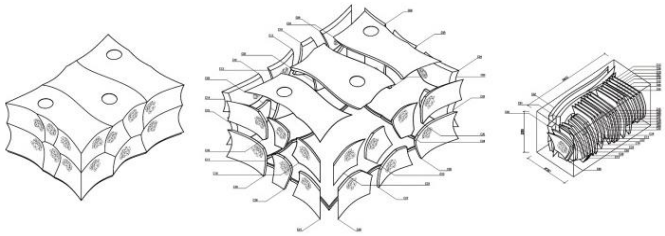
- التقنيات المستخدمة فى التصنيع المضاف AM : من خلال إستخدام الطابعة ثلاثية الأبعاد وإستخدام نمذجة الترسيب بالإنصهار أو تقنية تصنيع الخيوط المنصهرة Fused Filament Fabrication (FFF) .

شكل رقم (٢٢) يوضح أثناء التصنيع
المرجع : https://oliverdavidkrieg.com/?p=675

- آلية العمل والتشغيل: إستخدام الفتحات الخارجية من خلال التحكم فى أشعة الشمس داخل المبنى والتحكم فى التهوية الطبيعية .



شكل رقم (٢٣) يوضح التحكم فى دخول الإضاءة الخارجية بشكل ذاتى إستجابة للمتغيرات المناخية المحيطة .
المرجع : https://oliverdavidkrieg.com/?p=675



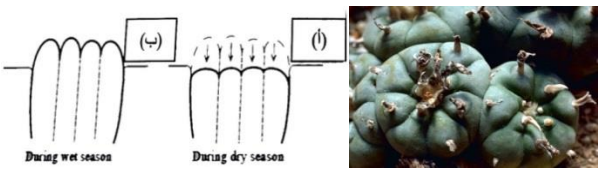
شكل رقم (٢٤) يوضح أن الغلافالخارجى للجناح هو فى نفس الوقت بنية حاملة وجلد حساس للمبنى .
المرجع : https://oliverdavidkrieg.com/?p=675

(٢-٩) مركز تكنولوجيا المعلومات والاتصالات Media-Tic :
مركز تكنولوجيا المعلومات والاتصالات Media-Tic للمعمارى إنريك رويز جيلى Enric Ruiz Geli ، ببرشلونه ، ٢٠١٦. هو أحد المعالم البارزة في برشلونة، وهو مبنى إدارى يستخدم كمكان إجتماع للشركات والمهنيين . وبه مساحات مخصصة للتدريب .

شكل رقم (٢٥) يوضح واجهة مبنى مركز تكنولوجيا المعلومات والاتصالات ببرشلونهMedia-Tic
المرجع : https://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic

يعتمد غلاف المبنى على نظام مبتكلر بإستخدام مادة ETFE من حيث الإعتماد على خواص المادة والقابلية للتمدد والإنكماش ، وأدى ذلك إلى توفير الطاقة بنسبة ٢٠٪ ويظهر سطح الغلاف على شكل فسيفساء من المثلثات المقعرة والمحدبة ، تسمى هذه المادة البلاستيكية EFTE (إيثيلين رباعى فلورو إيثيلين) ، وهى عبارة عن "جلد" موفر للطاقة ، إنها وسائد تنفتح أو تنكمش حسب الطقس . ويعتمد هذا المشروع أيضاً على تحقق مبادئ المحاكاة الحيوية لنبات صبار وليمز Mescal Buttons لتحقيق أنظمة معمارية تستجيب للمناخ ولأشعة الشمس .

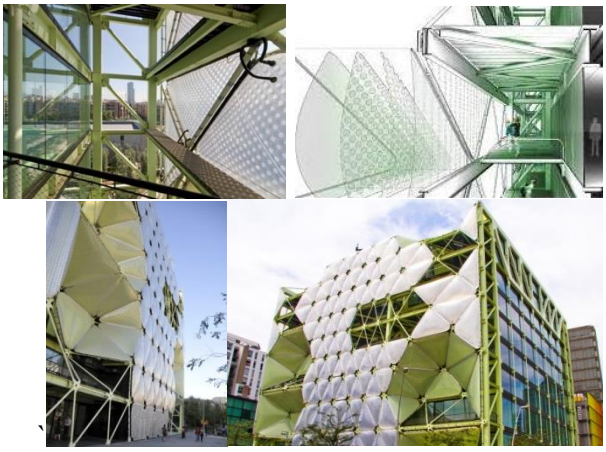
- نبات صبار وليمز Mescal Buttons : تظهر خاصية المرونة فى الحجم لبعض النباتات وهى التى تتقلص وتتمدد طبقاً للظروف البيئية ، حيث يغمر صبار وليمز تحت الأرض فى موسم الجفاف عن طريق تقليص وتقليل طول النبته كحالة قصوى للتكيف مع البيئة الصحراوية ، وعلى العكس فى موسم الأمطار .



شكل رقم (٢٦) نبات صبار وليمز Mescal Buttons ، (أ) يتقلص أو ينكمش الصبار فى موسم الجفاف تحت الأرض ، (ب) ينتفخ أو يتمدد أو يرجع الصبار للظهور فى موسم الأمطار .

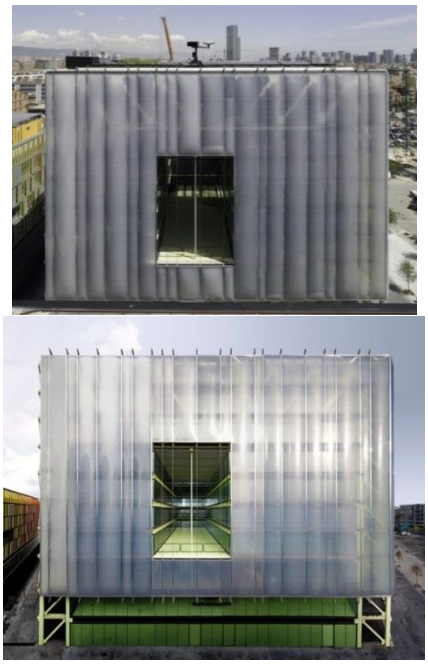
- فكرة المشروع : يتميز مبنى Media-Tic بغلاف خارجى مميز ومبتكر من مواد حية نشطة خاصة ، حيث تم إستخدام بوليمر (ETFE) (إيثيلين رباعى فلورو إيثيلين) بتصميم جديد يعتمد على تكنولوجيا المعلومات فى أنظمة الحركة دون الحاجة إلى محركات بحيث يعتمد على خواص المادة نفسها فى التمدد والإنكماش، لكى تتكيف مع المناخ الخارجى للمبنى . يتم تنشيط الأليات تلقائياً بواسطة مستشعرات الضوء التى تستجيب لوجود الطاقة الشمسية ، تم إستخدام تطبيق على الواجهة الجنوبية الشرقية ، يسمى ETFE

Diaphragm ، بينما فى الجنوب الغربى يأخذ شكل نظام يوصف بأنه تكوين ETFE Lenticular . فى كلتا الحالتين ، تم تحسين أداء تغطية ETFE بإستخدام مستشعرات مقياس الضوء التى يمكنها تنشيط الآليات الهوائية تلقائياً إستجابة لوجود الطاقة الشمسية .
يشتمل غشاء ETFE على الإرتفاع الجنوبى الشرقى على ثلاث طبقات من المواد ، الطبقة الأولى من ETFE شفافة ، ولكن الطبقتين الثانية والثالثة تصميم "نقطة البولكا Polka " ذى النمط العكسى والذى عند تضخيمه أو تفريغه ، يجعل الواجهة شفافة أو غير شفافة ، وبالتالى يمنع إختراق الشمس إذا لزم الأمر .



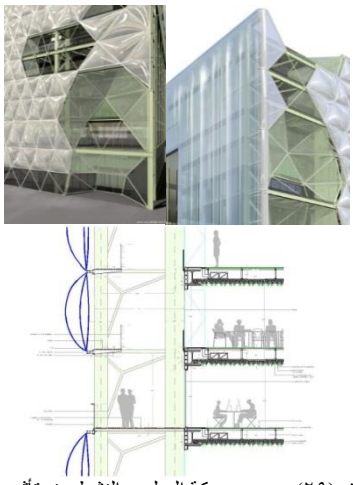
شكل رقم (٢٧) صور توضح نظام حركة الواجهة .
المرجع : https://www.barcelonaturisme.com/wv3/en/page/4313/media-tic.html

على الجانب الجنوبى الغربى ، يستخدم التكوين العدسى ETFE Lenticular حلاً أكثر إبداعاً ، هنا يتم ترتيب المادة كسلسلة من الأكياس الطويلة عندما تضرب الشمس المستشعرات يقوم النظام الآلى بحقن الوسائد على الفور بسحابة كثيفة من غاز النيتروجين ، لتقريب أشعة الشمس على الفور .



شكل رقم (٢٨) يوضح الواجهة الجنوبيه الشرقية الأمامية ويظهر تأثير المحفزات على الواجهة (ويظهر تأثير إنتفاخ أو حقن الوسائد على الصوره بالأعلى)
المرجع : https://arquitecturaviva.com/articulos/estetica-de-la-energia

- المحاكاة الحيوية : من خلال الإستشعار و الإستجابة من خلال محاكاة نبات صبار وليمز.
- العنصر التصميمى : من خلال الواجهة المعمارية المستجيبه للحراة وضوء الشمس .
- المواد الحيوية رباعية الأبعاد : البوايمر النشط EFTE (إيثيلين رباعى فلورو إيثيلين) .
- المحفز : الحرارة حيث عندما يسخن ضوء الشمس المبنى فى أوقات معينة من اليوم ، تتمدد أسطح شريط البوليمر المطاطى لخلق ظل داخل المبنى بالإضافة إلى المجال الكهربائى .

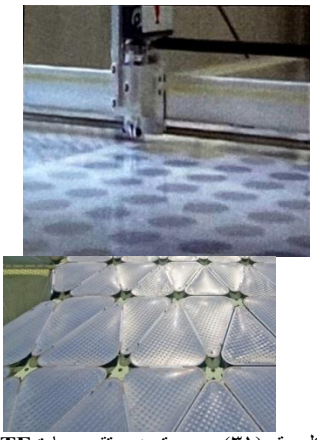


شكل رقم (٢٩) يوضح حركة البوليمر النشط عند تأثره بالمحفز .
المرجع : https://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic

- سلوك تغير الشكل : الإنكماش والتمدد Contraction and Stretching

شكل رقم (٣٠) قطاع يوضح إنكماش وتمدد واجهة المبنى عند تعرضها لدرجة حرارة مرتفعة .
المرجع : https://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic

- التقنيات المستخدمة فى التصنيع المضاف AM : من خلال إستخدام الطابعة ثلاثية الأبعاد وإستخدام نمذجة الطباعة الحجريه2PP، والطباعة Polyjet



شكل رقم (٣١) صور توضح تقسيم مادة **EFTE** عن طريق تقنية Polyjet Printing
المرجع : https://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic

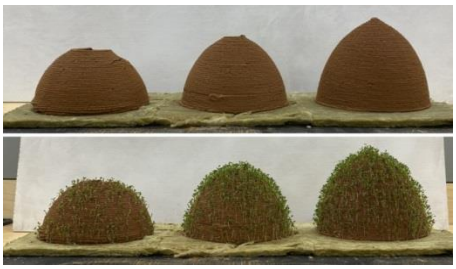
ـ آلية العمل والتشغيل: تقليل إستهلاك الطاقة داخل المبنى بنسبة ٩٠ % ، نظرا لإستخدام EFTE كمادة عازلة ، حماية من الإشعاع الشمسى والعمل كنظام تبريد ذاتى .

١٠ـ تطبيق الطباعة رباعية الأبعاد في التصميم الداخلى :

فحتى الأن وطبقاً لما سبق ونظراً لأن الطباعة رباعية الأباعاد مازالت قيد الدراسه من قبل الباحثين والدراسين، نستخلص بعض الدراسات التى من الممكن الإستعانه بها في التصميم الداخلى .

ـ نموذج لفاصل أو حائط داخلى مزروع رباعى الأبعاد :

إذا كنا نستمتع بوجود الطبيعة على أنها فن في الفراغات الداخلية ، فإننا نحاول بأي ثمن تجنب وجود طبيعة "حقيقية" معوقة في جدراننا وهياكلنا ، والتي يمكن أن تتلف بسبب الجذور والأوراق . في الوقت نفسه .على الرغم من تقدم المواد الحيوية والتقنيات الجديدة يتغير هذا الأمر تدريجيًا ، حيث تعد الطباعة رباعية الأبعاد، أو التصنيع الإضافي، في التصميم الداخلى والمعمارى وتشييد المباني سوقًا ناشئًا، مدفوعًا بإهتمام المجتمع بالمباني الخضراء والإستدامة والبيئة بصفة عامة . حيث إبتكر باحثو جامعة فيرجينيا طريقة للطباعة رباعية الأبعاد بتربة مشبعة بالبذور يمكن للنباتات أن تنمو عليها بحرية ، والتى يمكن إستخدامها لإنشان جدران داخلية أو فواصل داخلية بين الفراغات مملؤة بالحياة الطبيعية . بحيث يكون المبنى بفراغاته الداخلية ليس منفصلاً عن الطبيعة الخارجية ويحدث تكامل بين الداخل والخارج . وطوّر الفريق طريقة للطباعة رباعية الأبعاد باستخدام مواد حيوية ، وبدلاً من المواد الخرسانية أو البلاستيكية التقليدية ، فإن المادة الخام المستخدمة هي التربة نفسها والنباتات المحلية الممزوجة بالماء ويتم إدخالها في الطابعة لتشكيل الجدران والهياكل .
تكون فريق الباحثين من من جي ما Ji Ma ، الأستاذ المساعد لعلوم وهندسة المواد في كلية الهندسة والعلوم التطبيقية بجامعة فيرجينيا؛ و ديفيد كار David Carr ، أستاذ باحث في قسم العلوم البيئية في جامعة فيرجينيا؛ وإحسان باهارلو Ehsan Baharlou ، أستاذ مساعد في كلية الهندسة المعمارية بجامعة فيرجينيا ، وسبنسر بارنز Spencer Barnes ، طالب في الجامعة . وأجروا تجاربهم على الخلطات الأكثر ملائمة للطباعة ، وذلك من خلال طريقتين : طباعة التربة والبذور في طبقات متتالية أو خلط البذور مع التربة قبل الطباعة . كلا النهجين يعملان بشكل جيد. وقام فريق البحث بإختبار كيفية خروج المواد من رأس الطابعة أو الفوهة ، وهى عملية تسمى البثق.



شكل رقم (٣٢) نموذج أولى للتجربة.
المرجع : https://www-arch-virginia-edu/news/uva-researchers-3d-print-soil-structures-that-can-grow plants?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ar&_x_tr_hl=ar&_x_tr_pto=sc#main-content

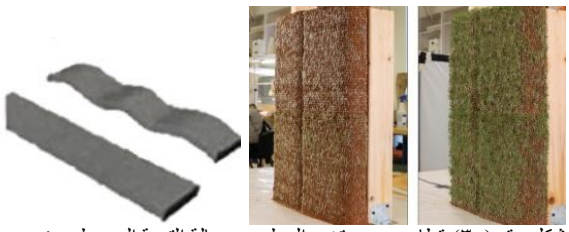
وكما أشار جي ما في هذه المقالة التي نشرتها الجامعة ، فإن "التربة المطبوعة ثلاثية الأبعاد تميل إلى فقدان الماء بسرعة أكبر وتحافظ على قبضتها بشكل أقوى على المياه الموجودة فيها"، كما قال ما" .نظرًا لأن الطباعة ثلاثية الأبعاد تجعل البيئة المحيطة بالنبات أكثر جفافًا ، يتعين علينا دمج النباتات التي تحب المناخات الأكثر جفافًا . السبب الذي يجعلنا نعتقد أن هذا هو الحال هو أن التربة تصبح مضغوطة .عندما يتم ضغط التربة من خلال الفوهة ، يتم دفع فقاعات الهواء للخارج . وعندما تفقد التربة فقاعات الهواء، فإنها تتمسك بالمياه بقوة أكبر.
و مما سبق يمكن عمل فواصل أو حوائط داخلية من تربة مزروعة داخل الفراغات الداخلية .
ـ المحاكاة الحيوية : من خلال الإستشعار و الإستجابة من خلال محاكاة النبات فى مرحلة النمو.
ـ العنصر التصميمى : من خلال فاصل أو حائط دخلى مستجيب للضوء .
ـ المواد الحيوية رباعية الأبعاد : تربة زراعية نشطة وبذور نباتات من Genus Sedum (نوع معمر ومتعدد الأنواع ومتعدد الفروع ويزرع على كثير من أنواع التربة ويتحمل الظروف البيئية ويحتاج القليل من الإهتمام) ، ومواد حساسة للضوء .

شكل رقم (٣٣) قطاع يوضح حائط داخلى مطبوع بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد بإستخدام تربة مزروعة بالبذور ينمو الزرع خلال عدد من الساعات .
المرجع : https://engineering.virginia.edu/internal-search?s=4D-Printing+Technology

- المحفز : الضوء حيث تبدأ البذور بمرحلة الإنبات وتتم عملية الإنبات خلال عدة أيام أو أسابيع حسب نوع البذرة ، وأشعة الشمس.

شكل رقم (٣٤) يوضح نمو التربة نتيجة للمحفز
المرجع : https://engineering.virginia.edu/internal-search?s=4D-Printing+Technology

- سلوك تغير الشكل : تغير السمات الطبوغرافية السطحية .



شكل رقم (٣٥) قطاع يوضح تغير السطح من حالة التربة إلى سطح مزروع .
المرجع : https://engineering.virginia.edu/internal-search?s=4D-Printing+Technology

- **التقنيات المستخدمة فى التصنيع المضاف AM :** الطباعة بالبثق Extrusion ، روبوت صناعى .

شكل رقم (٣٦) صورة توضح روبوت صناعى بإمتداد من ٣ إلى ٤ أقدام يمكنه وضع المواد المخصصة وفقاً للأهداف المرغوبة من المصمم
المرجع : https://www-arch-virginia-edu/news/uva-researchers-3d-print-soil-structures-that-can-grow plants?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ar&_x_tr_hl=ar&_x_tr_pto=sc#main-content

- **آلية العمل والتشغيل:** الغطاء النباتى بالفراغات يسحب ويقلل من ثانى أكسيد الكربون وينقى الهواء ويرطب الهواء بالفراغات الداخلية بالإضافة إلى العزل الطبيعى للفراغات الداخلية .

نتائج البحث و التوصيات :

- الطباعة رباعية الأبعاد هى فن الجمع بين العلم وتكنولوجيا الهندسة والتصنيع .
- تبحث الطباعة رباعية الأبعاد في تطوير المواد الحية الجديدة والمحفزات والنمذجة الرياضية من الناحية التكنولوجية الهندسية .
- تتيح عمليات الطباعة رباعية الأبعاد تطبيقات مبتكرة يصعب تحقيقها بإستخدام عمليات التصنيع التقليدية .
- إن إستخدام تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد في الفراغات المعمارية تجعلها تتفاعل مع البيئة المحيطة دون الحاجه إلى أجهزة إستشعار وأنظمة ميكانيكية معقدة ومكلفة ولها عمر إفتراضى ، فهى تعمل بشكل ذاتى دون تدخل خارجى .
- هنالك العديد من الأبحاث والدراسات لإدخال منظومة تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد في عناصر الفراغات الداخلية كالأسقف والواجهات والهيكل الإنشائى وغيره ....لتحقيق الأهداف البيئية المرجوه.
- إن إستخدام تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد تعمل على زيادة كفاءة إستخدام الموارد الطبيعية كالضوء والهواء وتوفير إستهلاك الطاقة .
- تتميز الطباعة رباعية الأبعاد بإمكانيات رئيسية : التجميع الذاتى والتكيف الذاتى والإصلاح الذاتى مما يساعد على إستخدامها فى مجالات مختلفة وتحقق نجاح غير مسبوق قبل ذلك ، من خلال خفض تكاليف التصنيع والنقل.
- يوصى البحث بالإستفادة من نتائج البحث ومحاولة تطبيق ما تم التوصل إليه من مفاهيم ودروس مستفادة وفق مقتضيات الواقع المحيط . والقيام بدراسة إمكانية تطبيق تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد في بيئتنا المحلية .و عمل بحوث مشتركة بين التخصصات الهندسية المختلفة لوضع إمكانيات وسبل تطبيق هذه التكنولوجيا . والتوصية بدراسة تقنيات التصنيع المضاف وتقنيات الطباعة رباعية الأبعاد في التخصصات العلميه المختلفة لإمكانية الإستفادة منها في مجالات متعددة في الحياة .

مراجع البحث :

أولا : المراجع العربيه

١- مارينا محروس عبد المسيح توفيق – "تفاعل المبنى مع الظروف البيئية المحيطة بإستخدام تكنولوجيا الطباعة رباعية الأبعاد" – رسالة ماجستير – قسم العمارة – كلية الهندسة – جامعة القاهرة – ٢٠٢٣.

٢- محمد محمد رياض عبد السلام – " الإستفادة من تقنيات النماذج الأولية المتطورة فى مجال التصميم الصناعى فى ضوء الثورة الصناعية " - مجلة التصميم الدولية- المجلد ١٣- العدد ٢- ٢٠٢٣.

٣- مروة حسين توفيق حسين و شيماء محمود حسن – " تطبيق تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في إنتاج الأثاث الكمي " - مجلة التصميم الدولية- المجلد ٦- العدد ٤- ٢٠١٦ .

ثانيا: المراجع الأجنبيه :

4- Ahmed , Aamir ; Arya , Sandeep; Guptab ,Vinay; Furukawa , Hidemitsu and Khosla , Ajit (2021) : "4D printing: Fundamentals,

materials, applications and challenges " . Published by Elsevier Ltd . The International Journal for the Science and Technology of Polymers . Volume 228 .

5- Mahmood , Ayyaz ; Akram ,Tehmina ; Chen , Huafu and Chen, Shenggui (2022) : " On the Evolution of Additive Manufacturing (3D/4D Printing) Technologies: Materials, Applications, and Challenges". Polymers Journal . Volume 14 . Issue 21 .

6- Aldawood , Faisal Khaled (2023): " A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges " . actuators journal - Volume 12 . Issue 3 .

7- Mehrpouya,Mehrshad ; Vahabi,Henri ; Janbaz,Shahram; Darafsheh,Arash ; R. Mazur ,Thomas and Ramakrishna , Seeram (2021) : "4D printing of shape memory polylactic acid (PLA)" . The International Journal for the Science and Technology of Polymers . Volume 230 .

8- Razzaq , Muhammad Yasar ; Gonzalez-Gutierrez , Joamin ; Mertz , Gregory ; Ruch, David ; F. Schmidt , Daniel and Westermann , Stephan (2022) : " 4D Printing of Multicomponent Shape-Memory Polymer Formulations " . Applied Sciences . Volume 12 . Issue 15 .

9- Dong, Xinyu ; Zhang,Fenghua; Wang, Linlin ; Liu , Yanju and Leng , Jinsong (2022) " 4D printing of electroactive shape-changing composite structures and their programmable behaviors" . Composites Part A: Applied Science and Manufacturing . Volume 157 .

10- Alshebly,Yousif Saad ; Nafea ,Marwan; Ali ,Mohamed Sultan Mohamed and Almurib ,Haider (2021) : "Review on recent advances in 4D printing of shape memory polymers" . European Polymer Journal . Volume 159 **.**

ثالثا : مواقع أنترنت :

- https://www.arch2o.com/?_ga=2.57704876.768664595.1701852474-1159552026.1701852474
- https://www.archdaily.com/966556/have-you-heard-of-4d-printing-bridging-additive-manufacturing-with-smart-materials#
- https://www-arch-virginia-edu/news/uva-researchers-3d-print-soil-structures-that-can-grow-plants?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ar&_x_tr_hl=ar&_x_tr_pto=sc#main-content
- https://arquitecturaviva.com/articulos/estetica-de-la-energia
- https://www.barcelonaturisme.com/wv3/en/page/4313/media-tic.html https://caddcentre.com/blog/?s=4D-Printing+Technology
- https://www.connectionsbyfinsa.com/?s=smart+materials
- https://creativecommons.org/?s=4D+Design+the+smart+materials+
- https://www.designboom.com/architecture/hygroskin-a-climate-responsive-kinetic-sculpture/
- https://engineering.virginia.edu/internal-search?s=4D-Printing+Technology
- https://www.mdpi.com/2073-4360/11/11/1864
- https://oliverdavidkrieg.com/?p=675
- https://www.researchgate.net/figure/Aspects-associated-with-4D-Printing-for-developing-Manufacturing-culture_fig1_352001448
- https://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic
- https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/best-articles-about-3d-printing/4d-printing-technology/