العدد الحادي عشر
ديسمبر ٢٠٢٣

الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف

Technical Dimensions Of 3D Printing Technology in The Field of Ceramic

اعداد

م.م/ إبراهيم دسوقي عبد الموجود سليمان

مدرس مساعد بقسم التربية الفنية

كلية التربية النوعية – جامعة جنوب الوادي

أ.د/ محمد سعيد عبد الله

أستاذ الخزف وعميد كلية التربية النوعية – جامعة جنوب الوادي

د/ رشا فوزي احمد

مدرس الخزف بقسم التربية الفنية كلية التربية النوعية – جامعة جنوب الوادي

مجلة جامعة جنوب الوادي الدولية للعلوم التربوية

المعرف الرقمي للبحث DOI

10.21608/musi.2023.227395.1132

الترقيم الدولي الموحد الالكتروني

2636-2899

موقع المجلة عبر بنك المعرفة المصري

musi.journals.ekb.eg

١٤٤٥هـ/٢٠٢٣م

ملخص البحث:

هدف البحث إلى التعرف على الأسس الفكرية للأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف. استخدم البحث المنهج الوصفي. وتوصل البحث إلى العديد من النتائج من أهمها، تعزيز الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف نهج متعدد التخصصات بين معلمي الفنون والفنانين والفنيين لدعم دمج الفن والطباعة ثلاثية الأبعاد في العملية التعليمية؛ وإن الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف تتيح المزيد من الالتزام والتحفيز والمشاركة والوصول إلى مستويات أعلى من الإبداع الفني في مجال الخزف؛ وستساعد الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف في تغطية عددًا كبيرًا ونطاقًا كاملاً من الأسئلة حول كيفية دمج تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف؛ وتؤدي الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف لتطور كبير في الاحتمالات التصميمية بدلا من التفكير في قيود التصميم الخزفي. وأوصى البحث بناء على نتائجه بالاستفادة من دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف وتطبيقها كاتجاهات جديدة في العملية التعليمية؛ والعمل على نشر الوعي بتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف أكاديميًا وفنيًا في المتاحف واستوديوهات الفن لإلهام التفكير النقدي والإبداعي وتمكينه؛ وتشجيع مشاريع البحث الإجرائي التي يجريها معلمي الفنون والفنانون للتحقيق في تكامل الطباعة ثلاثية الأبعاد والفن والتعاون عبر مجالات الموضوع.

الكلمات المفتاحية:

الأبعاد التقنية، تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد، الخزف.

Technical Dimensions Of 3D Printing Technology in The Field of Ceramic

Abstract:

The research aimed to identify the intellectual foundations of the technical dimensions of 3D printing technology in the field of ceramics. The research used the descriptive method. The research reached several results, the most important of which is the promotion of the technical dimensions of 3D printing technology in the field of ceramics, a multidisciplinary approach between art teachers, artists and technicians to support the integration of art and 3D printing in the educational process; The technical dimensions of 3D printing technology in the field of ceramics allow for more commitment, motivation, participation, and access to higher levels of artistic creativity in the field of ceramics. The technical dimensions of 3D printing technology in the field of ceramics will help cover a large number and a whole range of questions about how to integrate 3D printing technology in the field of ceramics; The technical dimensions of 3D printing technology in the field of ceramics lead to a great development in the design possibilities instead of thinking about the limitations of ceramic design. Based on its results, the research recommended benefiting from studying the technical dimensions of 3D printing technology in the field of ceramics and applying them as new directions in the educational process. And work to spread awareness of 3D printing technology in the field of ceramics academically and artistically in museums and art studios to inspire and enable critical and creative thinking; and encourage action research projects conducted by art educators and artists to investigate the integration of 3D printing and art and collaboration across subject areas.

key words:

Technical Dimensions; 3D Printing Technology; Ceramic.

مقدمة:

يعتبر ظهور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، التي يشار إليها أيضًا باسم التصنيع الإضافي (AM)، بمثابة ثورة في تقنيات التشكيل.

وتعد الطباعة ثلاثية الأبعاد فلسفة تشكيل فريدة تتيح الإعداد المرن للهياكل شديدة التعقيد والدقة التي يصعب تحقيقها باستخدام طرق التشكيل التقليدية مثل الصب والتشكيل الآلي. (Chen & et.al., 2019, p. 661).

فالطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Printing) تقنية مبتكرة لإنتاج نماذج دقيقة للغاية، ويتم تصنيع النماذج المطبوعة ثلاثية الأبعاد بدقة وفقًا للمواصفات الموجودة في الملف الرقمي (Digital File).

والطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد تتيح أشكالًا معقدة ومتنوعة من الخزفيات التي لا يمكن انتاجها بواسطة عمليات التشكيل التقليدية مثل صب المُعلق أو الشرائح. (Ji & et.al., 2021, p. 2)

واستنادًا إلى نوع وشكل المواد الأولية المستخدمة في الطباعة، يمكن تصنيف الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد إلى عمليات طباعة قائمة على:

- الملاط "Slurry-Based".
- المسحوق "Powder-Based".
- الكتلة الصلبة "Bulk Solid-Based".

مشكلة البحث:

تتيح الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف إنتاجًا خزفيًا أكثر إبداعاً وتنوعاً وتعقيداً من الخزفيات التي تُنتج بواسطة تقنيات التشكيل التقليدية مما يتيح أفاق جديدة للإبداع الفني.

وهذا ما أشارت اليه دراسة **العامري (٢٠١٦)**، بأن استخدام التكنولوجيا الحديثة في المجالات الفنية المختلفة يعد أمرًا حتميًا لمواجهة المفاهيم الجديدة في ظل فنون الحداثة وما بعدها. (ص. ٢٣٧)

وأوصت دراسة "**المعداوي وحسين**" بإن تنفيذ تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والاستفادة منها في تنفيذ أفكار مبتكرة وإضافة قيم جمالية وتصميمية وتكنولوجية متنوعة وأكثر دقة لتحقيق العالمية في العمل الفني. (المعداوي و حسين، ٢٠٢١، ص ٣٦٣)

وما توصلت إليه دراسة **Menano & et.al., (2019)** على أن دمج تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجالات التصميم والفنون، يمكّن الفنانين وعلمي الفنون من استخدام وسيلة جديدة تمامًا لتنمية إبداع الفني للفنانين وكذلك طلاب الفنون. (p. 233)

وكذلك ندرة الأبحاث والدراسات التي تناولت الأسس التقنية والتكنولوجية للطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

وفي ضوء ما سبق تكمن مشكلة البحث وهي الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف. ويمكن تحديد مشكلة البحث في التساؤل التالي:

- ما الأسس الفكرية للأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف؟

هداف البحث:

- التعرف على الأسس الفكرية للأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

أهمية البحث:

١. تناوله الأسس الفكرية الطباعة ثلاثية الأبعاد الذي لا تزال مصدر اهتمام الباحثين وموضوع حديث وفعال في مجال الخزف.

٢. تزويد العملية التدريسية في مجال الخزف بالتكنولوجيا الحديثة.

٣. بيان أهمية دمج تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية وعلاقتها بتطوير وتنمية إبداع الطالب والفنان.
٤. إثارة تحفيز الإبداع الفني في ضوء الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.
٥. تشكل الدراسة نموذجًا نظريًا لتقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد.
٦. تسهم في تكوين مجموعة المعرفة حول الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.
٧. يقدم هذا البحث أدبه نظرية يمكن توظيفهما لإجراء دراسات أخرى تتناول متغيرات جديدة غير المتغيرات التي تناولتها الدراسة الحالية.

منهجية البحث:

يتبع البحث المنهج الوصفي التحليلي في تحديد الأبعاد التقنية للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

مصطلحات البحث:

الطباعة ثلاثية الأبعاد:

عرف **Cline, (2015)** الطباعة ثلاثية الأبعاد هي "آلة تبني نموذجًا ماديًا من نموذج رقمي، تقوم بذلك عن طريق إضافة طبقات متتالية من المواد على سطح مستوٍ يسمى لوحة البناء وتذيب تلك المواد في شكل النموذج". (p. 5)

كما ذكر **Rafiq, (2018)** أنه وفقًا لتقرير وهلر Wohler لعام ٢٠١٤، وأيضًا بواسطة اللجنة الدولية (ASTM F42) تم تعريف الطباعة ثلاثية الأبعاد على أنها "تصنيع الأشياء بأبعاد ثلاثية من خلال ترسيب مادة باستخدام رأس طباعة أو فوهة أو تقنية طابعة أخرى". (p. 3)

وعرف **Klusáček, (2017)** الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد على أنها "نوعًا من التكنولوجيا التي تولد منتجًا مباشرةً من نموذج افتراضي عن طريق إضافة طبقة مادة بطبقة، ويتم تغذية المادة للعملية على شكل مسحوق أو معجون أو مُعلق". (p. 13)

وذكر **Christopher, (2016)** بأن الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد تعرف باسم ترسيب الخزف المُلتَحِم (FDC) وهي "قذف الطين شبه السائل من خلال فوهة دقيقة لإنشاء مجسم خزفي يتم حرقه وتزجيجه بالطريقة العادية". (p. 39)

ويعرفها الباحث اجرائيًا: بأنها تقنية إنتاج خزفيات معاصرة عن طريق ترسيب طبقات الطينات المحلية المعالجة فوق بعضها البعض حتى يكتمل شكل الجسم الخزفي.

الدراسات المرتبطة:

الدراسات العربية:

١. دراسة: رشوان، (٢٠٢٠) بعنوان: "استراتيجية لتطوير الخامات في تكنولوجيا تصميم وتصنيع الخزف بالإضافة".

هدفت الدراسة إلى إعداد استراتيجية لدور التكنولوجيا الحديثة للخامات وطرق التصنيع مما يصقل من مهارات المصمم المهنية في استخدام تقنيات النمذجة الحديثة في التصميم، وتحليل للخامات الخزفية الحديثة المستخدمة في ماكينات 3D Printer، ودراسة الخامات الخزفية الجديدة المستخدمة في ماكينات AM وخاصة في ماكينات الطباعة ثلاثية الابعاد في مجال الخزف ومحاولة تحسين خواصها من خلال الإضافات بما يخدم متطلبات تصميم المنتج وإخراج النموذج الأول. وتفيد هذه الدراسة البحث الحالي في دراسة تكنولوجيا تصنيع الخزف بالإضافة. وتختلف هذه الدراسة مع البحث الحالي في اعتمادها على نظام البثق عن طريق مكبس هوائي. أما في هذا البحث فسيتم دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

٢. دراسة: شحاتة، (٢٠١٩) بعنوان: "تطبيقات الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال التصميم الداخلي والأثاث".

هدفت الدراسة إلى عرض ودراسة تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، واستخداماتها المقترحة في مجال التصميم الداخلي والأثاث، وتفنيد أوجه الاختلاف والتشابه بين تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد والتقنيات التقليدية التي تعتمد على الحاسب الآلي مثل آلات التحكم الرقمي (CNC) في إنتاج أشكال مجسمة ثلاثية الأبعاد في مجال التخصص، وتسليط الضوء على أهمية الطباعة ثلاثية الأبعاد بالنسبة لتطبيقات اتجاهات التصميم الحديثة كالبيومكري والبارامتري. وتفيد هذه الدراسة البحث الحالي في دراسة الطباعة ثلاثية الأبعاد. وتختلف هذه الدراسة مع البحث الحالي في تناولها تطبيقات الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال التصميم الداخلي والأثاث. أما في هذا البحث فسيتم دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

٣. دراسة: نجيب، (٢٠١٨) بعنوان: "فلسفة الطباعة الرقمية ثلاثية الأبعاد على التصميم المعمارى".

هدفت الدراسة إلى تقديم رؤية فنية لأحد تكنولوجيات الفنون الرقمية ألا وهي التصميم الجرافيكي الرقمي، وتوضيح مفهوم البناء "تاريخه وتصميماته الجرافيكية المختلفة"، وتنفيذ تصميم معماري ثلاثي الأبعاد وإبراز تأثير الجرافيك الرقمي عبر تكنولوجيا المستقبل، وتفيد هذه الدراسة البحث الحالي في دراسة الطباعة ثلاثية الأبعاد. وتختلف هذه الدراسة مع البحث الحالي في تناولها فلسفة الطباعة الرقمية ثلاثية الأبعاد على التصميم المعماري. أما في هذا البحث فسيتم دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

الدراسات الأجنبية:

١. دراسة Zhao, (2021) بعنوان:

"Research on The Application of Ceramic 3D Printing Technology".

هدفت الدراسة إلى تحليل واستخدام مزايا تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد للخزف، من أجل ضخ حيوية جديدة في صناعة الخزف التقليدية، وتفيد هذه الدراسة البحث الحالي في تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد. وتختلف هذه الدراسة مع البحث الحالي في تناولها بحث في تطبيق تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد. أما في هذا البحث فسيتم دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

٢. دراسة Vastamäki, (2019) بعنوان:

"Stereolithography Ceramic 3D-Printing".

هدفت الدراسة إلى التعرف على الوضع الحالي للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في العالم ودراسة العوامل الحاسمة المطلوبة لإنتاج مكونات الخزف المطبوعة بنجاح. وتفيد هذه الدراسة البحث الحالي في تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد. وتختلف هذه الدراسة مع البحث الحالي في تناولها الطباعة الحجرية ثلاثية الأبعاد للخزف. أما في هذا البحث فسيتم دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

٣. دراسة Nash, (2018) بعنوان:

"3D Printed, Self-glazed Ceramics: An Investigation Inspired by Egyptian Faience".

هدفت الدراسة إلى تقديم مراجعة تاريخية وسياقية للخزف المصري وإجراء تقييم مرئي لمصنوعات الخزف التقليدية والمعاصرة لإنشاء معايير مرجعية للمواد المختلفة قيد التطوير خلال البحث، وتقديم مراجعة سياقية للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد لتقديم نظرة عامة ووضع سياق للبحث في مجال مواد الطباعة ثلاثية الأبعاد / تطوير العمليات للتطبيقات الإبداعية في الفن والتصميم، والتحقق من الطباعة ثلاثية الأبعاد للرابط المسحوق كوسيلة لتشكيل أجسام خزفية ذاتية التزجيج باستخدام تقنية التزجيج المستوحاة من الخزف المصري، تطوير هيكل زجاجي أو عالي التزجيج للسيراميك ثلاثي الأبعاد القابل للطباعة والحرق الواحد. وتفيد هذه الدراسة البحث الحالي في تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد. وتختلف هذه الدراسة مع البحث الحالي في تناولها الخزف ذاتي التزجيج بالطباعة ثلاثية الأبعاد مستوحى من الخزف المصري.

أما في هذا البحث فسيتم دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

٤. دراسة Zocca, (2015) بعنوان:

"Additive Manufacturing of Porous Ceramic Structures from Preceramic Polymers".

هدفت الدراسة إلى: وصف التصنيع الإضافي للهياكل المسامية بدءًا من خلائط Preceramic. وتفيد هذه الدراسة البحث الحالي في تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد. أما في هذا البحث فسيتم دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

الإطار النظري:

أولًا: الأبعاد التقنية للطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف:

بدأ تاريخ الطباعة ثلاثية الأبعاد في الثمانينيات في اليابان، حيث بدأت بالطباعة الحجرية الحجرية الستيريوليثغرافي Stereolithography (SLA) لأول مرة في عام ١٩٨٣م، وبعد ظهرت العشرات من التقنيات الأخرى تحت المسمى الشائع الطباعة ثلاثية الأبعاد، منها التلبيد الانتقائي بالليزر selective laser sintering(SLS) في عام ١٩٩٠م. (Kocovic, 2017, p. 1). ثم عام ١٩٩١م ظهرت ثلاث تقنيات أخرى للطباعة ثلاثية الأبعاد، بما في ذلك نمذجة الترسيب المنصهر fused deposition modeling (FDM)، ومعالجة الأرض الصلبة solid ground curing (SGC)، وتصنيع النماذج الرقائقي laminated object manufacturing (LOM). (Wohlers & Gornet, 2016)

توسعت تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد بشكل كبير في مطلع الحادي والعشرون نتيجة انتشار هذه التقنيات، حيث دفعت العديد من الأسباب والمميزات للاهتمام بهذه التقنية كالتقدم العلمي والتكنولوجي المتسارع، والرقمنة في دورة التصميم والإنتاج، والاستخدام والتطبيق والتطوير والتجريب في إطار نموذج الابتكار المفتوح في سياق العولمة الرقمية (Ruscitti

(Menano & et.al., 2019, p. 222 ؛ انخفاض التكاليف، سهولة استخدام البرامج، وتوافر برامج مفتوحة المصدر. (Menano & et.al., 2019, p. 222)

وظهرت العديد من المصطلحات المستخدمة لوصف تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد خلال تاريخها، كالتصنيع الإضافي Additive Processes (AM)، والعمليات المضافة Additive Processes، والتقنيات المضافة Additive Techniques، وتصنيع الطبقة المضافة Additive Layer Manufacturing، وتصنيع الطبقات Layer Manufacturing، والتصنيع الصلب الحر Solid Freeform Fabrication، والتصنيع الحر Freeform Fabrication، وغيرها. (Ruscitti & et.al., 2020, p. 355)

وفي عام ٢٠١٥م، وضع معيار ISO / ASTM 52900 إطارًا واضحًا للطباعة ثلاثية الأبعاد على أنها "تصنيع كائنات من خلال ترسيب مادة باستخدام رأس طباعة أو فوهة أو تقنية طباعة أخرى" (ISO/ASTM 52900, 2015)؛ فالطباعة ثلاثية الأبعاد هي "عملية التصنيع بالإضافة يتم من خلالها إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد عن طريق إضافة طبقات عبر وضع انتقائي (أو تشكيل) للمواد". (Menano & et.al., 2019, p. 2)؛ وتعرف أيضاً بأنها "عملية ضم المواد لصنع أجزاء من بيانات نموذج ثلاثي الأبعاد، عادةً طبقة فوق طبقة، على عكس منهجيات التصنيع الطرحي Subtractive والتصنيع التكويني Formative". (Slotwinski, 2021, p. 358)

يتكون الخزف بشكل تقليدي من خليط من مسحوق المواد الأساسية مع مواد رابطة ومثبتات. وتشمل تقنيات التشكيل التقليدية صب المعلق slip casting، وصب الشريط tape casting، والضغط pressing، والدمج المباشر direct consolidation، والقولبة بالحقن injection moulding. (Bengisu, 2001, p. 104) تتضمن هذه التقنيات عملية متعددة الخطوات تؤدي إلى قيود من حيث أوقات المعالجة الطويلة والتكلفة العالية. نتيجة لذلك، اكتسبت

الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد اهتمامًا، حيث توفر إمكانيات جديدة تمامًا لمعالجة المشكلات والتحديات في الإنتاج الخزفي.

بالمقارنة مع التشكيل بالطرق التقليدية، فإن التشكيل بالطباعة ثلاثية الأبعاد يكون أكثر سرعة وكفاءة، مع تكلفة تصنيع أقل لمنتجات الخزف، يتميز المنتج المطبوع ثلاثي الأبعاد المصمم بمساعدة الحاسوب بدقة أعلى من المنتجات الخزفية المصنوعة يدويًا.

ويمكن أن تساعد معالجة مواد الخزف باستخدام تقنيات الطباعة ثلاثية الابعاد في التغلب على القيود في التشكيل، والتخلص من الأنماط أو الأدوات ذات التكلفة والوقت، وتقليل المعالجة الخضراء وهدر المواد الخام، والاستغناء عن التلحيم وتقليل عدد الأجزاء، حرية التصميم. (Karandikar & et.al., 2018, p. 175)

وهناك طريقتان للتشكيل في تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد: التشكيل المباشرة وغير المباشرة. (Zhang & Yang, 2016)، (Lakhdar & et.al., 2021)

- **التشكيل المباشر:** تستخدم الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في التشكيل المباشرة ملاط/معاجين المواد الخزفية عالية المرونة والكثافة كمادة البثق يمكن تشكيلها بسهولة وربطها ببعضها البعض بإحكام.
- **التشكيل غير المباشر:** يطبع أولاً نموذجًا أوليًا بلاستيكيًا للمنتج، ثم يستخدم النموذج الأولي لصنع قالب من الجبس لتصنيع المنتجات الخزفية.

استخدامات تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد:

أ. التعلم Education:

تُستخدم تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد في المدارس والمكتبات العامة والمتاحف ومؤسسات التعليم العالي من أجل: (Novak, 2022, p. 2)

- استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد للمشاريع القائمة على حل المشكلات.
- التثقيف حول التكنولوجيا ثلاثية الأبعاد وممارسات التصميم.
- إنشاء أو استخدام المصنوعات المطبوعة ثلاثية الأبعاد كوسائل تعليمية.

- إنتاج التقنيات المساعدة للطلاب ذوي الاحتياجات الخاصة.

ب. الفنون Arts:

- **الحفظ والترميم:** يمكن اعتبار الطباعة ثلاثية الأبعاد مفيدة في المساعدة في مراقبة حالة القطع الأثرية في الماضي والحاضر والمستقبل، مما يجعل من الممكن البحث في السلوك المادي للعمل الفني. (Beentjes, 2019, p. 81)
- **دراسة الأعمال الفنية:** حقيقة أن النسخ الفردية للأعمال الفنية والتحف الهشة يمكن للطباعة ثلاثية الأبعاد صنعها بكميات كبيرة تجعل من الممكن دراسة هذه الأعمال الفنية على نطاق أوسع وبطرق مختلفة. (Ballarin & et.al., 2018, p. 57)
- **دراسة التراث الثقافي:** يحفز استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد بشكل فعال العملية الإبداعية للمستخدمين ويمكن أن يزيد ذلك من سهولة فهم عناصر التراث الثقافي من حولنا، والتعامل معها بحرية وبشكل مختلف، وبالتالي تحفيز أنواع مختلفة من الأساليب وطرق تحليلها. (Tissen, 2022, p. 7)
- **الابداع الفني:** توفر تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد طرقًا جديدة للفنانين لاستكشاف فنهم، وأيضًا وسيلة لأي شخص لإعادة تصور الفن الحالي.

فوائد تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد:

تتلخص فوائد تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد: (Dumitrescu & Tanase, 2016, p. 35)، (Vinayagam & et.al., 2021, p. 408)

١. **التصميم المرن Flexible design:** تسمح الطباعة ثلاثية الأبعاد بتصميم وتنفيذ تصميمات أكثر تعقيدًا، على العكس من تقنيات التنفيذ التقليدية التي تضع قيودًا على التصميم.

٢. **النماذج الأولية السريعة Rapid prototyping:** تعمل الطباعة ثلاثية الأبعاد، التي يمكنها إنشاء مكونات في ساعات، على تسريع عملية إنشاء النماذج الأولية. نتيجة

لذلك، يمكن إكمال كل مرحلة بسرعة أكبر وتكلفة أقل وأسرع في تصنيع الأجزاء، مما يؤدي إلى معالجات تصميمية أسرع بكثير.

٣. **الطباعة عند الطلب Print on demand:** على عكس عمليات الإنتاج التقليدية التي تتطلب مساحة كبيرة لتنفيذ وتخزين المنتجات، فالطباعة عند الطلب لا تتطلب ذلك، مما يوفر المساحة والمال؛ حيث يتم استخدام برنامج ثلاثي الأبعاد والتي تمكن حفظ ملفات النمذجة ثلاثية الأبعاد في مكتبة افتراضية وحفظها بتنسيق CAD أو STL، وكذلك تسمح بتحرير ملفات المنتجات.

٤. **القوة وخفة الوزن Strong and lightweight:** تتيح الطباعة ثلاثية الأبعاد إنتاج نماذج أخف وزناً، يمكن أن إنتاج نماذج باستخدام المواد المخصصة ذات خصائص فريدة مثل مقاومة الحرارة أو القوة المحسنة أو مقاومة الماء.

٥. **تصميم وإنتاج سريع Fast design and production:** توفر الطباعة ثلاثية الأبعاد الوقت في عملية الإنتاج حيث يمكن طباعة النماذج في ساعات – بناءً على تصميم وتعقيد النموذج – وهو أسرع بكثير من النماذج المصبوبة أو المشكَّلة. كما يمكن طباعة نماذج متطابقة في أي مكان في العالم حيث تتطلب عملية التصميم والإنتاج فقط إلى ثلاثة أشياء، طابعة وملف رقمي يمكن إرساله.

٦. **التقليل من الهدر Minimizing waste:** تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد عملية "خضراء" لأن مادة الطباعة تتم إضافتها طبقة تلو الأخرى، بالكمية الدقيقة التي تتطلبها مواصفات الإنتاج، تحت تحكم محوسب. مقارنة بعمليات الإنتاج التقليدية التي تستهلك قدراً كبيراً من المواد غير القابلة لإعادة التدوير.

٧. **فعالية التكلفة Cost–Effective:** توفر الطباعة ثلاثية الأبعاد –كعملية إنتاج من خطوة واحدة– الوقت والموارد بدلاً من استخدام العديد من الأجهزة، أيضًا يمكن إعداد الطابعات ثلاثية الأبعاد وتركها للتشغيل دون الحاجة إلى تواجد المشغلين في جميع

الأوقات. كما ذكرنا سابقًا، وكذلك التبديل من إنتاج نماذج معقد إلى إنتاج نماذج أبسط دون الحاجة إلى أي تكلفة إضافية أو إهدار للوقت والمواد الخام.

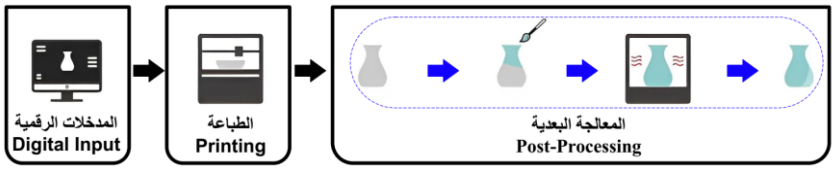
مراحل عملية الطباعة الخزفية ثلاثية الابعاد:

تتمثل عملية الطباعة الخزفية في ثلاث مراحل رئيسية، شكل (١)، فيما يلي: (Gürsoy, 2018, p. 24)

١. **المدخلات الرقمية Digital Input**: كالهيئة Geometry مثل المجسمات، المنحنيات، المسطحات؛ الترميز Coding مثل برنامج مُوَلّد G code، تحديد جيل G code.

٢. **الطباعة Printing**: كالمواد Material مثل الأنواع المختلفة من الطين، مادة مفردة أو متعددة، ألوان مختلفة؛ والأدوات Tools مثل الشكل وقطر الفوهة؛ إعدادات الطباعة Printing Parameters مثل سرعة الطباعة، سرعة البثق، ارتفاع الطبقة، ارتفاع الفوهة؛ قاعدة الطباعة print base ثابتة أو ديناميكية، مسطحة أو غير مسطحة؛ المؤثّرات الخارجية Exterior Stimuli درجة الحرارة، الرطوبة، ..إلخ

٣. **المعالجة البعدية Post-Processing**: كالمعالجة اليدوية hands-on manipulations مثل الصياغة، التشطيب؛ والحرق Firing مثل نوع الحرق، درجة حرارة الحرق؛ والمواد Material مع أو بدون تزجيج، نوع التزجيج، التوليف، ...إلخ



شكل (١): عملية الطباعة الخزفية ثلاثية الابعاد.

تصنيف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد:

يتمثل المعيار الرئيسي لتصنيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد هو المنهجية التكنولوجية المعتمدة، وفق المعايير التالية: (Travitzky & et.al., 2014, p. 730)

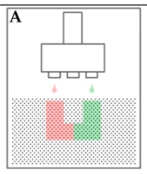
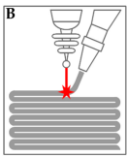
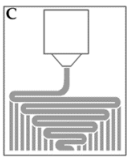
أ. **العنصر الهندسي Geometric Element:** النقطة Point، الخط Line، السطح Plane.

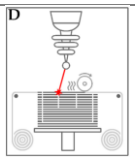
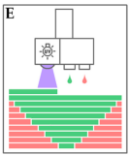
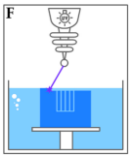
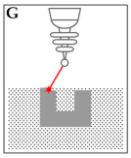
ب. **حالة المادة Material State:** سائل Liquid، معلق Suspension، مسحوق Powder، رقائق Sheet، عجينة paste، خيوط Filament.

ج. **طريقة الربط Join Method:** التلبيد Sintering، الانصهار Fusion، البلمرة Polymerization، التصفيح Lamination، البثق Extrusion، الترسيب بالحقن deposition by injection.

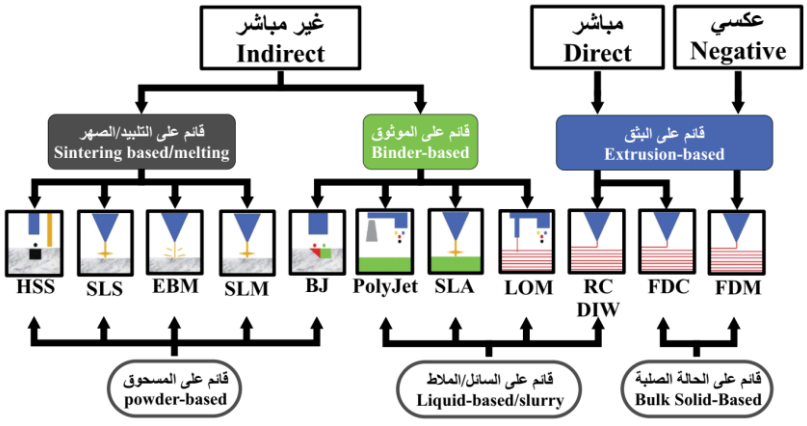
يمكن تصنيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد إلى سبع تقنيات، ويوضح جدول (١) تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، وفئات كل تقنية والخامات المستخدمة لكل فئة. (Ahangar & ey.al., 2019, p. 4)، (ISO/ASTM 52900, 2015)، (Ruscitti & et.al., 2020, p. 356)، (Redwood & et.al., 2017, pp. 20-21)

جدول (١): تصنيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد.

التقنية	الوصف		الفئة
نفث المادة الرابطة Binder Jetting	العملية التي يتم فيها ترسيب عامل الترابط السائل بشكل انتقائي لربط مواد المسحوق.		نفث المادة الرابطة BJ
ترسيب الطاقة الموجه Directed Energy Deposition	العملية التي يتم فيها استخدام الطاقة الحرارية المركزة لصهر المواد عن طريق الصهر أثناء ترسيبها.		تشكيل الشبكة المصمم بالليزر LENS التصنيع الإضافي بالأشعة الإلكترونيةEBAM
بثق المواد Material Extrusion	العملية التي يتم فيها توزيع المواد بشكل انتقائي من خلال فوهة أو فتحة.		نمذجة الترسيب المصهور FDM نمذجة الترسيب المعجون PDM

تصفيح الرقائق Sheet Lamination	العملية التي يتم فيها ربط صفائح المواد لتشكيل جزء.		تصنيع النموذج الرقائقي LOM
نفث المواد Material Jetting	العملية التي يتم فيها ترسيب قطيرات مواد البناء بشكل انتقائي.		نفث المواد MJ نفث الجسيمات النانوية NPJ الإسقاط عند الطلب DOD
البلمرة الضوئية بالحوض vat photopo-lymerization	عملية يتم فيها معالجة البوليمر الضوئي السائل في وعاء بشكل انتقائي عن طريق البلمرة المنشطة بالضوء.		الطباعة الحجرية SLA معالجة الضوء الرقمي DLP المعالجة المستمرة للضوء الرقمي CDLP
انصهار طبقة المسحوق Powder Bed Fusion	العملية التي تدمج فيها الطاقة الحرارية بشكل انتقائي مناطق طبقة المسحوق.		الانصهار متعدد النفث MJF تلبيد بالليزر الانتقائي SLS الإذابة بالليزر الانتقائي SLM الإذابة بالأشعة الإلكترونية EBM

يعتمد تصنيف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد على المواد الخام أو الإستراتيجية أو الأسلوب، شكل (٢).



شكل (٢): تصنيف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد.

أ. التصنيف وفق حالة المواد الخام المستخدمة:

يعتمد تصنيف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق المواد المستخدمة على حالات فيزيائية مختلفة بخصائص ريولوجية مختلفة، وعادة ما يتم تحضير المواد في هذه الحالات الثلاث: مسحوق جاف Powder، ملاط / سائل Slurry/Liquid، وحالة صلبة Solid-State. (Wang & et.al., 2019, p. 2636)، وفيما يلي وصف لتقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق المواد المستخدمة: (Pinargote & et.al., 2020, pp. 6,8,12)، (Chen & et.al., 2019, pp. 622,670)، (Wang & et.al., 2019, p. 2636)

١. **التقنيات القائمة على المسحوق powder-based:** تستخدم طبقات المسحوق التي تحتوي عادةً على جزيئات خزفية مفككة كمواد أولية، ويتم ربط الجزيئات إما عن طريق نشر مواد رابطة سائلة من خلال رؤوس الطباعة تقوم بنفث قطرات السائل الموثق "المادة الرابطة" بشكل انتقائي على المساحيق أو عن طريق اندماج المسحوق باستخدام الطاقة الحرارية التي توفرها حزمة الليزر من خلال طاقة أشعة الليزر لتلبيد / إذابة مساحيق السيراميك بشكل انتقائي.

٢. **التقنيات القائمة على السائل/الملاط slurry/Liquid-based:** تتضمن أنظمة سائلة أو شبه سائلة مشتتة بجزيئات خزفية دقيقة كمواد وسيطة، إما في شكل أحبار أو ملاط/معاجين، اعتمادًا على معدل التدفق واللزوجة. ويتم طباعة النماذج إما عن طريق البلمرة الضوئية أو الطباعة النافثة للحبر أو البثق.

٣. **التقنيات القائمة على الحالة الصلبة Bulk Solid-Based:** تشتمل على مواد أولية صلبة سائبة، وتتضمن الأساليب التي تستخدم صفائح المواد والأنظمة شبه المنصهرة التي يتم فيها تشتيت جزيئات السيراميك الدقيقة كمواد وسيطة، وتكون الأنظمة شبه المنصهرة عادةً من خلائط السيراميك / البوليمر.

ب. التصنيف وفق الإستراتيجية:

يمكن تصنيف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد إلى ثلاث استراتيجيات (مباشرة، غير مباشرة، وعكسية) (Zocca & et.al., 2015, pp. 1985-1986).

١. **مباشر Direct:** يعني أن المادة يتم ترسيبها مباشرة فقط في الموضع مع إعطاء الشكل المطلوب للنموذج النهائي.
٢. **غير المباشر Indirect:** يعني أنه يتم ترسيب طبقات من المادة مع إدراج مقطع عرضي (شريحة) لكل طبقة، وبعد الانتهاء من جميع الطبقات تتم إزالة المواد الزائدة المحيطة بالجزء لتحرير النموذج النهائي.
٣. **عكسي Negative:** يعني أن تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تُستخدم لإنتاج القوالب Mold، والذي يتم استخدامه على التوالي لإنتاج الجزء الأخير.

ج. التصنيف وفق الأسلوب:

يعتمد تصنيف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق الأسلوب المتبع لتشكيل النماذج إلى ثلاث أنواع التلبيد/الصهر، الموثق، البثق. (Yeong & et.al., 2013, p. 66)

١. **التقنيات القائمة على التلبيد/الصهر melting/Sintering based:** تتضمن تذوب جزيئات المسحوق بالكامل بواسطة الليزر وتندمج معًا بدلاً من مجرد رفع درجة الحرارة والسماح للجسيمات بالتلبيد معًا كما هو الحال في التلبيد الانتقائي بالليزر
٢. **التقنيات القائمة على الموثق Binder-based:** تتضمن تعليق مواد الخزف أو خلطها في مواد رابطة، ويتم ترسيخ أو ترسيب مُعلق المواد الخزفية عن طريق البلمرة الضوئية باستخدام ليزر الأشعة فوق البنفسجية، أو نفث قطرات من مادة رابطة بوليمرية على سطح طبقة مسحوق المواد الخزفية لتشكيل مقطع عرضي للجزء.
٣. **التقنيات القائمة على البثق Extrusion-based:** تتضمن تصنيع خيوط المواد الخام filament بمزيج مادة رابطة السيراميك ويتم إذابتها وبثقها من خلال فوهة، أو

من خلال الصب الآلي حيث يتم وضع خليط المواد الخزفية في حاقن ويتم ترسيبه من خلال فوهة بدون عملية تسخين.

تقوم الدراسة الحالية على الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق، نظرًا لكونها الأكثر انتشارًا في مجال الخزف الفني، وأيضًا لتكلفتها المنخفضة ودافع حركة الابتكار المفتوحة في صددها.

ثانيًا: الأبعاد التقنية للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق:

تُستخدم مواد الخزف في عدة فئات من الطباعة ثلاثية الأبعاد، ومع ذلك، فإن التقنيات التي تنطوي على البثق هي الأكثر انتشارًا في التصميم والفن والصناعة، نظرًا لتكلفتها المنخفضة ودافع حركة الابتكار المفتوحة. (Ruscitti & et.al., 2020, pp. 355-356). وتعتمد هذه التقنية على نهج البثق للمواد باستخدام خليط مادة يُبثق من خلال فوهة. (Redwood & et.al., 2017, pp. 27-28)

ويتمثل المعيار الرئيسي لتصنيف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في طبيعة الوسيط/المادة الرابطة؛ حيث تصنف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق إلى نوعين رئيسيين قائمان على طبيعة الوسيط/المادة الرابطة للمواد الخزفية المستخدمة: (Lakhdar & et.al., 2021, pp. 12-14)

١. **البثق القائم على الوسيط الشمعي Wax-based extrusion:** تتضمن تعليق مساحيق المواد الخزفية في وسط بوليمري، ويتم بثق معجون أو خيوط المركب الناتج من خلال فتحة صغيرة على منصة. ومن تقنيات البثق القائم على الوسيط الشمعي: كالترسيب المنصهر الخزفي Fused Deposition of Ceramics (FDC)، والتشكيل بالبثق الحر Extrusion Freeform Fabrication (EFF)، وتصلب البثق متعدد الأطوار Multiphase Jet Solidification (MJS). وتكون المواد الأولية على هيئة خيوط في حالة FDC وEFF أو خليط في حالة MJS من جزيئات خزفية معلقة في البوليمر أو الشمع تلدن بالحرارة، وتتمثل

آلية التصلب تقنيات البثق القائم على الشمع في جفاف المادة الرابطة البوليمرية عند التبريد.

٢. **البثق القائم على الوسيط المائي Water-based extrusion**: تتضمن تعليق مساحيق المواد في وسط مائي، ويتم بثق معجون المركب الناتج من خلال فتحة صغيرة على منصة. ومن تقنيات البثق القائم على الوسيط المائي كالصب الآلي (RC) Robocasting، والكتابة بالحبر المباشر Direct Ink Writing (DIW)، والبثق بالتجميد Freeze-Form Extrusion Fabrication (FEF)، والتشكيل البثق ذو الأساس المائي Aqueous Based Extrusion Fabrication (ABEF). وتكون المواد الأولية على هيئة ملاط خزفي أو هلام محمّل بكميات قليلة من الإضافات؛ وتتمثل آلية التصلب تقنيات البثق القائم على الماء في التبخر "تجفيف" المذيب أو التخثر أو تبلور الطور السائل المائي، أو من خلال الأشعة تحت الحمراء.

تتميز الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق عموماً بالسهولة النسبية للتشغيل وتكاليف الإنتاج المنخفضة. علاوة على ذلك، تتباين كلا التقنيتين القائمة على الماء والقائمة على الشمع فيما بينهما بالعديد من المميزات كما يلي: (Lakhdar & et.al., 2021, pp. 12-14)

- **تقنيات البثق القائمة على الماء:** كثافات خضراء عالية، نظام تسوية مبسط، انكماش تلبيد منخفض، صديقة للبيئة، انخفاض تكلفة المواد الأولية والأجهزة.
- **تقنيات البثق القائمة على الشمع:** الحرية في التصميم، التعقيد الهندسي، تصنيع مكونات دقيقة، لا تحتاج إلى مادة دعم ثانوية.

خصائص تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق:

تتميز تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق بالعديد من الخصائص منها: (Altıparmak & et.al., 2022, pp. 611-612)

- **تحميل المواد Material loading:** تولد التغذية المستمرة (خيوط، أو حبيبات، أو معجون) ضغط إدخال ثابتًا في الفوهة يتم من خلالها بثق المادة لتترسب طبقة تلوى الأخرى على منصة بناء.
- **تسييل المواد Material liquefaction:** توجد المادة المنصهرة في حاوية داخل رأس الطباعة؛ تسمى هذه الحاوية بالخزان في آليات البثق القائمة على الفتيل وغرفة التسخين في الآليات القائمة على المكبس. ويتم تطبيق الحرارة عن طريق مصدر حرارة مستمر حول الخزان.
- **القوة المطلوبة للترسيب Force Required For Deposition:** في المواد التي يمكن صهرها وترسيبها في درجات حرارة وضغوط منخفضة نسبيًا كالبوليمرات، تستخدم التروس أو العجلات لتوفير الضغط الكافٍ للتغذية المستمرة للمادة؛ أما في الحالات الأخرى، يلزم وجود غاز مضغوط، أو حقنة، أو مكبس، أو لولب لتحقيق القوة المطلوبة للترسيب.
- **ترسيخ الطبقات وربطها:** لتشكيل بنية كثيفة صلبة من الناحية المثالية، يجب أن يتطابق شكل وأبعاد الجزء المطبوع تمامًا مع بيانات CAD الخاصة به (أي دقة الأبعاد المثالية). ومع ذلك، يمكن أن يؤدي التوتر السطحي والجاذبية في بعض الحالات إلى تغييرات في أبعاد المواد المبثوقة بسبب تأثيرات التبريد والتجفيف؛ يمكن تخفيف الانكماش عن طريق تقليل معدل التبريد أو تقليل فرق درجة الحرارة بين رأس الطباعة والطبقات التي تمت طباعتها.
- **استخدام الهياكل الداعمة:** لتسهيل تصنيع الأشكال المعقدة تتطلب تقنيات ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق، وسيلة لدعم الميزات غير المتصلة والمستقلة للأجزاء التي يتم تصنيعها، حيث يتطلب تصنيع أي مكونات بها أجزاء بزاوية أكبر من ٤٥ درجة لمنصة البناء ما يعرف بالمتراكبات وهي هياكل دعم ذات وضع رأسي.

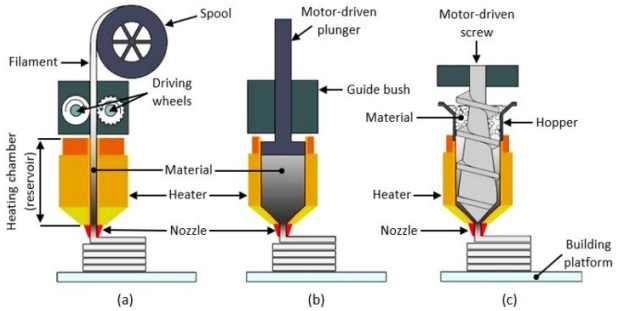
آليات بثق المواد في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد:

تتنوع طرق بثق المواد في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق الآلية المعتمدة وحالة المادة الخزفية المستخدمة، يمكن تصنيف طرق بثق المواد في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد إلى ثلاثة طرق، شكل (٣)، رئيسية وهما: (Gutierrez & et.al., 2018, pp. 6-9)، (Li & Leu, 2020, pp. 98-99)، (Altıparmak & et.al., 2022, pp. 612-613)، (Gleadal & et.al., 2018, p. 3)

١) **البثق بالخيوط Extrusion With Filament:** يتم تحضير الفتيل أو الخيوط المركبة عن طريق تحميل جزيئات المواد الخزفية في مواد رابطة عضوية (تلدن بالحرارة)، يتم تغذية الفتيل المركب المحمّل بجزيئات خزفية مثل Al2O3 أو Si3N4 في نظام نمذجة الترسيب المصهور (FDM)، حيث تم تسييل فتيل المواد الخام (صهره)، وبثقه من خلال فوهة وترسيبه طبقة تلو الآخرى على منصة البناء حيث يتصلب. حيث يكون الفتيل هو المكبس الذي يدفع المادة اللينة خارج رأس الطباعة حيث يتم سحب الفتيل أولاً بواسطة قوة ميكانيكية لدفعه نحو فوهة لإذابته وترسيبه.

٢) **البثق بالمكبس Extrusion with Plunger:** تستخدم المواد الخزفية في البثق بالمكبس في شكل معجون لدناً، ويمكن بثقها بطرق مختلفة، مثل استخدام القوة الهوائية pneumatic force، والمكبس الخطي linear plunger، وضخ المثقاب auger pumping، سوءاً مع أو بدون تسخين.

٣) **البثق بالطارد اللولبي Extrusion with Screws:** تستخدم المواد الخزفية في البثق بالطارد اللولبي في شكل حبيبات تنقل من خلال منطقة النقل الصلبة إلى منطقة الانصهار أو المزج، حيث يتم إذابة الكريات تحت تأثير الحرارة أو مزجها تحت تأثير الاحتكاك، ومن ثم تخضع المادة المنصهرة في منطقة المعايرة لضغط عالٍ قبل إخراجها من خلال الفوهة، ويقوم اللولب الدوار بضخ الواد الخزفية من منطقة التغذية إلى الفوهة.



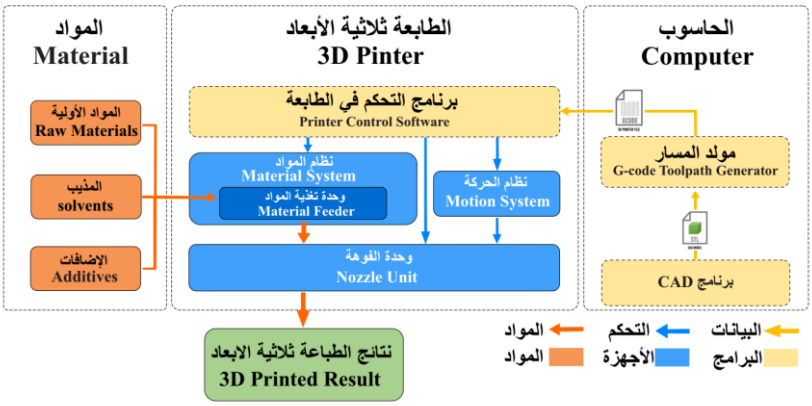
البثق بالطارد اللولبي **Screws** البثق بالمكبس **Plunger** البثق بالخيوط **Filament**

شكل (٣): طرق بثق المواد الخزفية في الطباعة ثلاثية الأبعاد.

نُظم الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق:

تتضمن عملية الطباعة النموذجية ثلاثة أجزاء رئيسية: البرامج Software، والأجهزة Hardware، والمواد Material، شكل (٤).

ويمكن تقسيم أجهزة الطابعة ثلاثية الأبعاد إلى أربعة أجزاء: وحدة التحكم Control Unit، ونظام الحركة Motion System، ونظام المواد Material System، ووحدة الفوهة Nozzle Unit.



شكل (٤): نُظم الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق.

يبدأ إجراء الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد من البرنامج Software إلى الأجهزة hardware:

- **البرامج Software:** حيث يتم تصميم وإنتاج النموذج عبر برنامج CAD؛ بعد ذلك، تتم معالجة النماذج المصممة في أوامر طباعة بواسطة أداة مولد المسار G-code Toolpath Generator.
- **المواد Material:** حيث يتم إعداد ملاط/معاجين المواد الخزفية ومعالجتها للوصول للخصائص المطلوبة.
- **الأجهزة Hardware:** حيث يتم نقل ملاط/معاجين المواد الخزفية إلى منصة الطباعة لتشكيل المنتج الخزفي ثلاثي الأبعاد عن طريق تقنيات الضخ Pumping أو الضغط Squeezing أو الدفع Pushing أو البثق Extruding؛ أخيرًا، تقوم الطابعة ثلاثية الأبعاد بتصنيع الإخراج المحدد من مسار الأداة الرقمية والمواد المختلطة.

نُظم الحركة في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق:

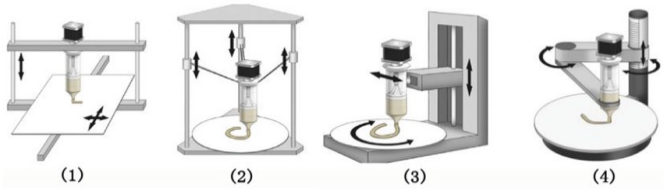
تحتاج الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق، إلى نظام حركة Motion System أوتوماتيكي لحمل وحدة الفوهة nozzle؛ عادةً ما يكون لنظام الحركة ثلاثة محاور X وY وZ، وفوهة الطباعة هي المحور E للبثق.

تُصنف أنظمة الحركة للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق، بناءً على التوجيه في مساحة ثلاثية الأبعاد إلى أربع فئات فرعية، شكل (٥)، وهي: (Dhanunjayarao & et.al., 2020, pp. 7-8)، (Kampker & et.al., 2019, p. 816)

١. **ديكارتي "Cartesian"**: عبارة عن ثلاث إحداثيات متعامدة بشكل متبادل XYZ بمساعدة مكون ثلاثي الأبعاد يطبع عن طريق تحديد الموضع الصحيح لاتجاه رأس الطباعة.
٢. **دلتا "Delta"**: تطبق النظام الديكارتي حيث يتم استخدام لوحة بناء دائرية ثابتة وثلاثة أذرع مدعومة بقضبان تحمل رأس الطباعة تتحرك لأعلى ولأسفل.

٣. **قطبي "polar"**: تدور لوحة التصميم حول المحور Z وتترجم في المستوى XY بينما يتحرك رأس الطباعة على طول مساحة العمل الكروية الثابتة في المحور Z.

٤. **الأذرع الروبوتية "SCARA"**: يتم وضع الطارد في المستجيب النهائي للذراع الآلي بينما يتم وضع بكرة الألياف قبل الطارد مباشرة.



شكل (٥): نظام الحركة للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق.

نُظم المواد في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق:

هناك ثلاثة أنواع من أنظمة المواد، هذه الأنظمة الثلاث توصف في فئتين هما: المغذيات المنفصلة Separate Feeder والمغذيات المدمجة Integrated Feeder، تقوم وحدة التغذية المنفصلة بتخزين ملاط/معاجين المواد الخزفية وتنقلها إلى فوهة الطباعة أو حاوية المواد المحلية عبر أنبوب النقل، بينما وحدة التغذية المدمجة تكون مدمجة بالفوهة مباشرًة.

١. **المغذيات المنفصلة Separate Feeder**: يتم نقل ملاط/معاجين المواد الخزفية من حاوية بعيدة إلى الفوهة عبر أنبوب pipe، تحت ضغط المكبس؛ قد تتضمن المغذيات المنفصلة وحدة تغذية منفصلة فقط، وتم إيداع ملاط/معاجين المواد الخزفية التي تم ضخها مباشرة على منصة الطباعة عبر طرف الفوهة؛ أو قد تم إيداع ملاط/معاجين المواد الخزفية من وحدة التغذية المنفصلة إلى وحدة أو آلية البثق.

٢. **المغذيات المدمجة Integrated Feeder**: يتم توصيل وحدة التغذية المدمجة بآلية البثق، لتغذية ملاط/معاجين المواد الخزفية مباشرة إلى الفوهة.

النتائج:

تتيح تقنيات الابتكار الرقمي مثل الطابعات ثلاثية الأبعاد الفرصة في مجال الخزف للفنانين والطلاب لعرض أفكارهم ودلالاتهم والرؤى

الفنية والفلسفية في العمل الفني. تجعل الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف من الممكن تقديم فرصة لدمج هذه التقنية في العملية التعليمية لدفع التعلم إلى الأمام من خلال التجارب والممارسات ذات الصلة. ومن ثم، فإن رأي البحث الحالي هو أن لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف أمر لا بد منه في العملية التعليمية والإبداعية ولاستهداف رفع الكفاءة المهنية لطلاب الفنون والفنيين.

ناقش البحث الحالي الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف، في محاولة لدمج تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف كمنهج في التعليم الفني، وتشجيع المحاضرين والمعلمين على دمج تلك التكنولوجيا والاستعانة بها عملية التعليم. تتيح الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف المحاضرون بدمج الوصول ما وراء المعرفي إلى المناهج التعليمية، وعرض المهام التي تنقل الفرص المهنية وتوجيهات التدريب والفرص المتاحة على تعليمهم. علاوة على ذلك، تمكن الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف فهم المعرفة الجديدة بشكل كامل وتصنيفها ووصفها بشكل كافٍ. وفي ضوء ما سبق يمكن تلخيص نتائج البحث على النحو التالي:

١. تعزيز الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف نهج متعدد التخصصات بين معلمي الفنون والفنانين والفنيين لدعم دمج الفن والطباعة ثلاثية الأبعاد في العملية التعليمية.
٢. إن الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف تتيح المزيد من الالتزام والتحفيز والمشاركة والوصول إلى مستويات عليا من الإبداع الفني في مجال الخزف.

٣. ستساعد معرفة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف في تغطية عددًا كبيرًا ونطاقًا كاملاً من الأسئلة حول كيفية دمج تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف.

٤. تؤدي الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف لتطور كبير في الاحتمالات التصميمية بدلا من التفكير في قيود التصميم الخزفي التقليدي.

٥. توفر تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف قدر كبير من المرونة في تنفيذ التصميمات الخزفية التي كان يصعب تنفيذها بالتقنيات التقليدية.

٦. توفر تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف الكثير من الوقت والجهد في مراحل التصميم الخزفي وصولًا إلى النموذج النهائي المناخ الإبداعي للفنانين وطلاب الفنون.

التوصيات:

١. الاستفادة من دراسة الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف وتطبيقها كاتجاهات جديدة في العملية التعليمية.

٢. العمل على نشر الوعي بتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف أكاديميًا وفنيًا في المتاحف واستوديوهات الفن لإلهام التفكير النقدي والإبداعي وتمكينه.

٣. تشجيع مشاريع البحث الإجرائي التي يجريها معلمي الفنون والفنانون للتحقيق في تكامل الطباعة ثلاثية الأبعاد والفن والتعاون عبر مجالات الموضوع.

المراجع

المراجع العربية:

١. رشوان، نهلة محمد حامد. (٢٠٢٠). استراتيجية لتطوير الخامات في تكنولوجيا تصميم وتصنيع الخزف بالإضافة. *اطروحة دكتوراة*. مصر: كلية الفنون التطبيقية، جامعة حلوان.

٢. شحاتة، شيماء عبد الستار. (٢٠١٩). تطبيقات الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال التصميم الداخلي والأثاث. *مجلة العمارة والفنون، المجلد ٤، العدد ١٥*، ص ص. ٣٢٧-٣٤٨.

٣. العامري، محمد حمود. (٢٠١٦). الاتجاهات المعاصرة في التربية الفنية. جامعة السلطان قابوس، كلية الآداب والعلوم الاجتماعية، *مجلة الآداب والعلوم الاجتماعية، مج٧, ع١*، ص ٢٣٧.، الصفحات ٢٢١-٢٤١.

٤. المعداوي، غادة دسوقي. وحسين، أسماء عبد المنعم (٢٠٢١): "الطباعة الرقمية الثلاثية الأبعاد وآثارها على تطوير مهارات التفكير الإبداعي لطلاب كليات الفنون التطبيقية"، كلية الفنون الجميلة جامعة المنيا، مجلة الفنون والعلوم الإنسانية، العدد ٧.

٥. نجيب، مايكل تادرس. (٢٠١٨). فلسفة الطباعة الرقمية ثلاثية الأبعاد على التصميم المعماري. *اطروحة دكتوراة*. مصر: كلية الفنون التطبيقية، جامعة حلوان.

المراجع الأجنبية:

6. Ahangar, P., & et.al. (2019). Current Biomedical Applications of 3D Printing and Additive Manufacturing. *MDPI, Applied Sciences, Vol. 9(8)*, pp. 1-23. doi: https://doi.org/10.3390/app9081713
7. Altıparmak, S. C., & et.al. (2022). Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives. *Journal of Manufacturing Processes, Vol. 83*, pp. 607-636. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.032
8. Beentjes, T. P. (2019). Casting Rodin's Thinker: Sand mould casting, the case of the Laren Thinker and conservation treatment

innovation. *PhD thesis*. Netherlands: Faculty of Humanities, University of Amsterdam.

9. Bengisu, M. (2001). *Production of Ceramic Bodies*. In Engineering Ceramics. Berlin, Heidelberg: Engineering Materials. Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-04350-9_3
10. Chen, Z., & et.al. (2019). 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society, Vol. 39(4)* 661-687. doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013
11. Christopher, B. (2016). *3D Printing* (Third Edition ed.). ExplainingTheFuture.com.
12. Cline, L. (2015). *3D Printing with Autodesk 123D, Tinkercad, and MakerBot*. New York, USA: McGraw-Hill Education.
13. Dhanunjayarao, B. N., & et.al. (2020). *3D Printing of Fiber Reinforced Polymer Nanocomposites: Additive Manufacturing*. In O. Kharissova, et.al., O. V. Kharissova, & et.al. (Eds.), Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications (pp. 1–29). Cham: Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11155-7_166-1
14. Dumitrescu, G. C., & Tanase, I. A. (2016). 3D Printing – A New Industrial Revolution. *Knowledge Horizons - Economics, vol. 8, issue 1*, pp. 32-39.
15. Gleadal, A., & et.al. (2018). Review of additive manufactured tissue engineering scaffolds: relationship between geometry and performance. *Burns & Trauma, Volume 6,* pp. 1-16. doi: https://doi.org/10.1186/s41038-018-0121-4
16. Gürsoy, B. (2018). *From Control to Uncertainty in 3D Printing with Clay*. 36th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe 2018 - Łódź, Poland (pp. 21-30). Łódź, Poland: Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe; Vol. 2.
17. Gutierrez, J. G., & et.al. (2018). Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-

Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. *MDPI, Materials, Vol. 11(5)*, pp. 1-36. doi: https://doi.org/10.3390/ma11050840

18. ISO/ASTM 52900. (2015). *Additive manufacturing — General principles — Terminology*. USA: ASTM Compass.
19. Ji, S. H., & et.al. (2021). Sintering Process Optimization for 3YSZ Ceramic 3D-Printed Objects Manufactured by Stereolithography. *Nanomaterials (Basel), 11(1)*. doi: https://doi.org/10.3390/nano11010192
20. Kampker, A., & et.al. (2019). Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. *Procedia CIRP, Vol. 81*, pp. 815-819. doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.205
21. Karandikar, P., & et.al. (2018). A*dditive Manufacturing (3D Printing) of Ceramics: Microstructure, Properties, and Product Examples.* In W. M. Kriven, & et.al., Proceedings of the 41st International Conference on Advanced Ceramics and Composites: Ceramic Engineering and Science Proceedings Vol. 38(3) (pp. 175-187). USA: The American Ceramic Society. doi: https://doi.org/10.1002/9781119474746.ch17
22. Klusáček, M. (2017). Využití 3D tisku k přípravě pokročilých keramických materiálů. *PhD thesis*. Česko: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
23. Kocovic, P. (2017). *3D Printing and Its Impact on the Production of Fully Functional Components: Emerging Research and Opportunities*. USA: IGI Global.
24. Lakhdar, Y., & et.al. (2021). Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science, Vol. 116*, pp. 1-50. doi: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736
25. Li, W., & Leu, M. (2020). *Material Extrusion Based Ceramic Additive Manufacturing*. In D. L. Bourell, & et.al., ASM

Handbook, Vol. 24, Additive Manufacturing Processes (pp. 97-111). USA: ASM International. doi: https://doi.org/10.31399/asm.hb.v24.a0006562

26. Menano, L., & et.al. (2019). Integration of 3D Printing in Art Education: A Multidisciplinary Approach. *Computers in the Schools, Interdisciplinary Journal of Practice, Theory, and Applied Research, Vol. 36*, 222-236. doi: https://doi.org/10.1080/07380569.2019.1643442
27. Nash, K. J. (2018). 3D Printed, Self-glazed Ceramics: An Investigation Inspired by Egyptian Faience. *PhD thesis*. UK: Faculty of Arts, Creative industries and Education, University of the West of England.
28. Novak, E. (2022). *3D Printing in Education*. Routledge. doi: https://doi.org/10.4324/9781138609877-REE81-1
29. Pinargote, N. W., & et.al. (2020). Direct Ink Writing Technology (3D Printing) of Graphene-Based Ceramic Nanocomposites: A Review. *MDPI, Nanomaterials, 10(7),* pp. 1-48. doi: https://doi.org/10.3390/nano10071300
30. Rafiq, N. (2018). *3D Printing Technology, Applications, and Selection*. UK: Taylor & Francis Group, LLC.
31. Redwood, B., & et.al. (2017). *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam, Netherlands: 3D Hubs B.V.
32. Ruscitti, A. F., & et.al. (2020). A review on additive manufacturing of ceramic materials based on extrusion processes of clay pastes. *Cerâmica, Vol. 66*, pp. 354-366. doi: https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802918
33. Slotwinski, J. A. (2021). Additive Manufacturing: The Current State of the Art and Future Potential. *Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 35*, Number 4, pp. 358-362.
34. Tissen, L. N. (2022). *3D Printing and the Art World: Current Developments and Future Perspectives*. IntechOpen. doi: https://doi.org/10.5772/intechopen.109107

35. Travitzky, N., & et.al. (2014). Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials. *Advanced Engineering Materials, Vol. 16(6),* pp. 729-754. doi: https://doi.org/10.1002/adem.201400097
36. Vastamäki, T. (2019). Ceramic technology: how to recognize clay processing. *Master thesis*. Finland: Faculty of Engineering and Natural Scien
37. Vastamäki, T. (2019). Ceramic technology: how to recognize clay processing. *Master thesis*. Finland: Faculty of Engineering and Natural Scien
38. Vinayagam, M., & et.al. (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings, Vol. 47(12)* pp. 405-409. doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596
39. Wang, J.-C., & et.al. (2019). Review of additive manufacturing methods for high-performance ceramic materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 103*, pp. 2627–2647. doi: https://doi.org/10.1007/s00170-019-03669-3
40. Wohlers, T. & Gornet, T. (2016). *History of Additive Manufacturing*. WOHLERS ASSOCIATES, INC: USA
41. Yeong, W. Y., & et.al. (2013). *State-of-the-art review on selective laser melting of ceramics*. In P. J. Bártolo, & et.al., High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (pp. 65-69). London, UK: CRC Press, Taylor & Francis Group.
42. Zhang, M., & Yang, L. (2016). Ceramic Product Forming Technologies Research Based on 3D Printing. *IEEE Access, vol. 4*, pp. 9345-9349. doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2642122
43. Zhao, B. (2021). Research on The Application of Ceramic 3D Printing Technology. *Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1827*, pp. 1-7. doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1827/1/012057

44. Zocca, A., & et.al. (2015). Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. *J. Am. Ceram. Soc., Vol. 98(7)*, pp. 1983–2001. doi: https://doi.org/10.1111/jace.13700