العدد الحادي عشر
ديسمبر ٢٠٢٣

دراسة تطبيقية لتصميم وتنفيذ طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد

An Applied Study for The Design and Implementation of a Ceramic 3D Printer

اعداد

د/ رشا فوزي احمد

مدرس الخزف بقسم التربية الفنية كلية التربية النوعية

جامعة جنوب الوادي

م.م/ إبراهيم دسوقي عبد الموجود سليمان

مدرس مساعد بقسم التربية الفنية

كلية التربية النوعية – جامعة جنوب الوادي

مجلة جامعة جنوب الوادي الدولية للعلوم التربوية

المعرف الرقمي للبحث DOI

10.21608/MUSI.2023.330547

الترقيم الدولي الموحد الالكتروني

2636-2899

موقع المجلة عبر بنك المعرفة المصري

musi.journals.ekb.eg

١٤٤٥هـ/٢٠٢٣م

ملخص البحث:

هدف البحث إلى تقديم تصور مقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد؛ وتنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح؛ وإنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة. استخدم البحث المنهج الوصفي والمنهج التجريبي. وتوصل البحث إلى العديد من النتائج منها، أن النموذج الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المقترح يعد شكل من أشكال تكنولوجيا إنتاج وتشكيل خزفية؛ ويتيح هذا انموذج تحكم فعال ومعاملات طباعة متعددة لعملية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد؛ ويساعد أيضًا في وضع إستراتيجيات تصميمية للمنتج الخزفي؛ كما يمكننا من إنتاج خزفيات ذات دقة عالية وأكثر تعقيدًا؛ ووضع إستراتيجيات لتجريب ومعالجة الطينات المحلية للإنتاج الخزفي. وأوصى البحث بناء على نتائجه بإجراء دراسات حول أثر استخدام تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في تحقيق القيم الجمالية والوظيفية للمنتجات الخزفية المطبوعة؛ وإتاحة تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد داخل العملية التعليمية بكليات الفنون؛ ودراسة دور استخدام تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في تطوير التفكير البصري والإبداعي لطلاب كليات الفنون.

الكلمات المفتاحية:

دراسة تطبيقية تصميم؛ تنفيذ؛ طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد.

An Applied Study for The Design and Implementation of a Ceramic 3D Printer

Abstract:

The research aimed to present a proposed concept for designing a 3D ceramic printer. Implementing the 3D ceramic printer according to the proposed design. Producing a three-dimensional ceramic model using Aswan clay through the implemented ceramic 3D printer. The research used the descriptive method and the experimental method. The research reached many results, including that the proposed ceramic 3D printer model is a form of ceramic production and shaping technology. This enables an efficient control model and multiple printing parameters for the ceramic 3D printing process; It also helps in developing design strategies for the ceramic product; It also enables us to produce ceramics of higher precision and more complexity. And developing strategies for experimenting and processing local clays for ceramic production. Based on its results, the research recommended conducting studies on the impact of using 3D ceramic printing technology in achieving the aesthetic and functional values of printed ceramic products. Making 3D ceramic printing technology available within the educational process in arts colleges; And studying the role of using 3D ceramic printing technology in developing the visual and creative thinking of students in art colleges.

key words:

Applied Study; design; implementation ; ceramic 3D printer.

مقدمة البحث:

يعتبر ظهور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، التي يشار إليها أيضًا باسم التصنيع الإضافي (AM)، بمثابة ثورة في تقنيات التشكيل. كما تعد 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). وبدأ تصنيع المواد المضافة في الثمانينيات من القرن الماضي في اليابان. تم اختراع الطباعة الحجرية ستيريوليثغرافي Stereolithography (SLA) لأول مرة في عام ١٩٨٣، وبعد ذلك اخترعت عشرات التقنيات الأخرى تحت الاسم الشائع للطباعة ثلاثية الأبعاد، منها التلبيد الانتقائي بالليزر selective laser sintering (SLS) في عام ١٩٩٠م (Kocovic, 2017, p. 1). وفي عام ١٩٩١، ظهرت ثلاث تقنيات 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) وتوسعت تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد بشكل كبير في مطلع القرن الجديد نتيجة انتشار هذه الابتكارات؛ والتي تميزت بالتقدم العلمي والتكنولوجي المتسارع، والرقمنة في دورة التصميم والإنتاج، والاهتمام المتزايد بالسوق، والاستخدام والتطبيق والتطوير والتجريب في إطار نموذج الابتكار المفتوح في سياق العولمة الرقمية (Ruscitti & et.al., 2020, p. 354)؛ وانخفاض التكاليف، وسهولة استخدام البرامج، وتوافر برامج مفتوحة المصدر (Menano & et.al., 2019, p. 222).

مشكلة البحث:

تتيح الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد إنتاج أشكالًا أكثر تعقيداً وإبداعاً وتنوعاً من الخزفيات التي لا يمكن إنتاجها بواسطة عمليات

التشكيل التقليدية. كما أنها تطرح العديد من التحديات بالنسبة لمستخدميها بسبب متطلبات المعالجة المتأصلة وحقيقة أنه لا يمكن استخدام كل الطينات لإنتاج الخزف بهذه التقنية، مما يترك جهودًا كبيرة في البحث والتطوير لتوظيف تلك التقنية بشكل فعال لإنتاج خزفيات معاصرة تحمل رؤى فلسفية، مما يتيح أفاق جديدة لإثراء الإبداع الفني في مجال الخزف من خلال استخدام الطين الأسواني.

وهذا ما أشارت اليه دراسة **العامري (٢٠١٦)**، بأن استخدام التكنولوجيا الحديثة في المجالات الفنية المختلفة يعد أمرا حتميا لمواجهة المفاهيم الجديدة في ظل فنون الحداثة وما بعدها. (ص. ٢٣٧) واوصت به دراسة "**المعداوي وحسين**" حيث إن تنفيذ تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد والاستفادة منها في تنفيذ أفكار مبتكرة واضافة قيم جمالية وتصميمية وتكنولوجية متنوعة وأكثر دقة لتحقيق العالمية في العمل الفني. (المعداوي و حسين، ٢٠٢١، ص ٣٦٣)

وأوصت كذلك دراسة **سالم والسيد (٢٠١٤)** بالاهتمام بالطباعة ثلاثية الأبعاد كونها مفيدة في مجالات مختلفة في مجال التربية الفنية بشكل عام كالنحت والتشكيل المجسم والحرف الفنية والخزف والفنون التركيبية وغيرها، عليه وجب الاهتمام بها من قبل المتخصصين. (ص. ٧١٣) وأكدت عليه دراسة **Menano & et.al., (2019)** على أن دمج الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجالات الفنون والتصميم، يمكن الفنانين والمعلمين من استخدام أداة جديدة تمامًا لتنمية إبداع الفني للفنانين وكذلك طلاب الفنون. (p. 233)

وكذلك لاحظ أعضاء البحث عدم توافر تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد ذات التحكم الفعال بجمهورية مصر العربية.

وفي ضوء ما سبق تكمن مشكلة البحث في عمل دراسة تطبيقية لتصميم وتنفيذ طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد، وإنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة.

ويمكن تحديد مشكلة البحث في التساؤلات التالية:

١. ما التصور المقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد؟
٢. هل يمكن تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح؟
٣. هل يمكن إنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة؟

فروض البحث:

١. يمكن تقديم تصور مقترح لتصميم وتنفيذ طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد.
٢. يمكن تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح.
٣. يمكن إنتاج نموذج خزفي معاصر ثلاثي الأبعاد باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة.

أهداف البحث:

١. تقديم تصور مقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد.
٢. تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح.
٣. إنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة.

أهمية البحث:

١. تناوله تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد الذي لا تزال مصدر اهتمام الباحثين وموضوع حديث وفعال في تكنولوجيا الخامات والتشكيل الخزفي.
٢. يتوقع أن تستفيد من هذا التصور المقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد مؤسسات تعليم الفنون وتطوير الفنون والحرف من خلال دمج تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية كأداة لتنمية الإبداع الفني.

٣. تقدم هذه الدراسة أدبه نظرية وأدوات يمكن توظيفهما لإجراء دراسات أخرى تتناول متغيرات جديدة غير المتغيرات التي تناولتها الدراسة الحالية.

وفي ضوء ما تقدم يمكننا تحديد أهمية الدراسة فيما يلي:

١. الأهمية العلمية (النظرية):

١. يشكل البحث نموذجًا نظريًا لتقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد.

٢. يسهم في التعرف على آليات تصميم وتنفيذ طابعة خزفية ثلاثية أبعاد.

٢. الأهمية العملية (التطبيقية):

١. تقديم تصور مقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد.

٢. تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح.

٣. بيان أهمية دمج تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية وعلاقتها بتطوير وتنمية إبداع الطالب والفنان.

٤. يساعد هذا البحث في تطور تكنولوجيا الإنتاج من خلال لتقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد مما يتيح أفاق جديدة في مجال الخزف الفني والصناعي.

٥. القاء الضوء على تقنيات خزفية مستحدثة.

محددات البحث:

تقتصر الدراسة الحالة على:

١. محددات موضوعية:

١. تقديم تصور مقترح لتصميم وتنفيذ طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد.

٢. تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح.

٣. إنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة.

منهجية البحث:

يتبع البحث المنهج الوصفي والمنهج التجريبي في تقديم التصور المقترح لتصميم الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وتنفيذها، وإنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة.

مصطلحات البحث:

الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد Ceramics 3D Printing:

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)

تُعرف اجرائيًا: بأنها تقنية إنتاج خزفيات معاصرة عن طريق وضع طبقات من الطين الأسواني فوق بعضها البعض حتى يكتمل شكل الجسم الخزفي.

الدراسات السابقة والمرتبطة:

الدراسات العربية:

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

تناولت الدراسة 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 وتناول تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد اعتماداً على نظام البثق عن طريق مكبس ميكانيكي ذو تحكم متعدد.

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 تصميم وتنفيذ نموذج طابعة خزفية ثلاثية أبعاد ذات تحكم فعال، وإنتاج نموذج خزفي.

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

تناولت الدراسة تقديم رؤية فنية لأحد تكنولوجيات الفنون الرقمية ألا وهي التصميم الجرافيكي الرقمي، وتوضيح مفهوم البناء المعماري "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 تصميم وتنفيذ نموذج طابعة خزفية ثلاثية أبعاد ذات تحكم فعال، وإنتاج نموذج خزفي.

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 تصميم وتنفيذ نموذج طابعة خزفية ثلاثية أبعاد ذات تحكم فعال، وإنتاج نموذج خزفي.

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 تصميم وتنفيذ نموذج طابعة خزفية ثلاثية أبعاد ذات تحكم فعال، وإنتاج نموذج خزفي.

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 القديم وإجراء تقييم مرئي لمصنوعات الخزف التقليدية والمعاصرة لإنشاء معايير مرجعية للمواد المختلفة قيد التطوير خلال البحث، وتقديم مراجعة نظرية للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد لتقديم نظرة عامة ووضع سياق للبحث في مجال خامات 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 تصميم وتنفيذ نموذج طابعة خزفية ثلاثية أبعاد ذات تحكم فعال، وإنتاج نموذج خزفي.

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. وتختلف هذه الدراسة مع البحث الحالي في تناولها التصنيع الإضافي للهياكل الخزفية المسامية

من البوليمرات Preceramic. أما في هذا البحث فسيتم دراسة تصميم وتنفيذ نموذج طابعة خزفية ثلاثية أبعاد ذات تحكم فعال، وإنتاج نموذج خزفي.

الإطار النظري

تشمل 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). وتتضمن 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.

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

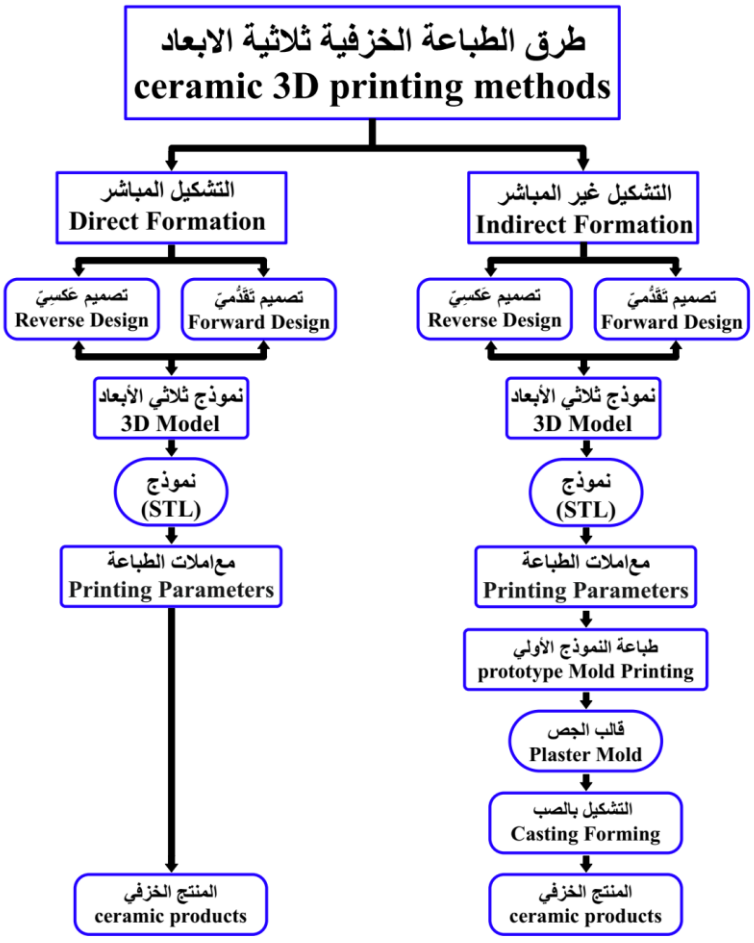
طرق الطباعة الخزفية ثلاثية الابعاد:

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

- **التشكيل المباشر:** تستخدم الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في التشكيل المباشر ملاط/عجائن المواد الخزفية عالية المرونة والكثافة كمادة البثق والتي يمكن تشكيلها بسهولة وربطها ببعضها البعض بإحكام.

- **التشكيل غير المباشر:** أولاً يطبع نموذجًا بلاستيكيًا أوليًا للمنتج، ثم يستخدم النموذج الأولي لصنع قالب من الجبس لتصنيع المنتجات الخزفية.

وتتضح خصائص ومراحل كلا طريقتي التشكيل في شكل (١).



شكل (١): مخطط لطرق الطباعة الخزفية ثلاثية الابعاد.

تصنيف تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد:

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.

ويقوم البحث الحالي على الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق، نظرًا لكونها الأكثر انتشارًا في مجال الفن، وأيضًا لتكلفتها المنخفضة ودافع حركة الابتكار المفتوحة في صددها والمداخل العديدة للابتكار من خلالها. ونتناول فيما يلي الأسس الفكرية والمبادئ التي تقوم عليها الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق.

الطباعة 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)

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 (٢)، 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:

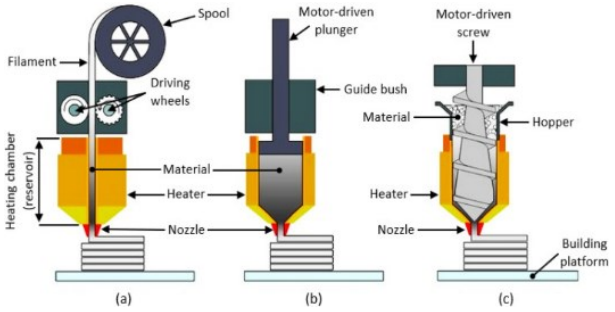
يتم تحضير الفتيل أو الخيوط المركبة عن طريق تحميل جزيئات المواد الخزفية في مواد رابطة عضوية (تلدن بالحرارة)، يتم تغذية الفتيل المركب المحمّل بجزيئات خزفية مثل Al2O3 أو Si3N4 في نظام نمذجة الترسيب المصهور (FDM)، حيث تم تسييل فتيل المواد الخام (صهره)، وبثقه من خلال فوهة وترسيبه طبقة تلو الآخرة على منصة 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. شكل (٢-أ)

٢) 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. شكل (٢-ج)

٣) 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. شكل (٢-د)



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

شكل (٢): طرق بثق المواد الخزفية في الطباعة ثلاثية الأبعاد.

يتضمن البثق بالمكبس فئتين وفق مراحل تغذية المادة وهما: (Ruscitti & et.al., 2020, p. 359)

١. البثق بالمكبس أحادي الخطوة Single-step:

يتكون البثق بالمكبس ذو الخطوة المفردة من أسطوانة يوضع بها المعجون، ومكبس أو بستم يجبرها على التدفق عبر الفوهة، ويتم تشغيل المكبس بطريقتين، شكل (٣).

- الطارد الهوائي Pneumatic Extruder: أي من خلال الهواء المضغوط مثل المحركات الخطية.
- الطارد الميكانيكي Mechanic Extruder: أي من خلال القوة الخطية لآلية اللولب أو الصامولة.

الطارد الميكانيكي Mechanic Extruder

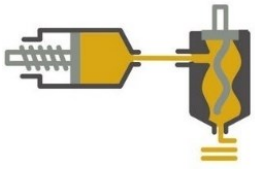
الطارد الهوائي Pneumatic Extruder

شكل (٣): البثق بالمكبس أحادي الخطوة Singl-Estep.

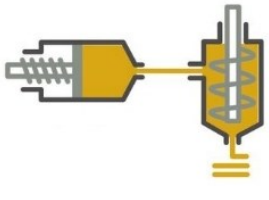
٢. البثق بالمكبس ثنائي الخطوة Two-steps:

تستخدم الأجهزة ذات الخطوتين المكبس الهوائي أو الميكانيكي لتغذية المواد من خلال خرطوم إلى الخطوة الثانية حيث يحدث البثق؛ وتتم باستخدام آلية من نوعين، شكل (٤).

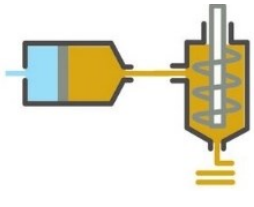
- لولب أرخميدس Archimedes' screw، مثل تلك المستخدمة في آلات البثق في صناعة الخزف.
- المكبس اللانهائي Endless Piston، أو مضخة لولبية لامركزية Moineau pumps، والتي تتكون من دوار معدني حلزوني بسيط ذو محور ثابت مرن مع تجويف حلزوني مزدوج.



الطارد الميكانيكي مع المكبس اللانهائي



الطارد الميكانيكي مع لولب أرخميدس



الطارد الهوائي مع لولب أرخميدس

شكل (٤): البثق بالمكبس ثنائي الخطوة Two-steps.

نُظم الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق:

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

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

- **البرامج Software:** حيث يتم تصميم وإنتاج النموذج عبر برامج CAD؛ بعد ذلك، تتم معالجة النماذج المصممة في أوامر طباعة بواسطة أداة مولد المسار G-code Toolpath Generator.
- **المواد Material:** حيث يتم إعداد ملاط/عجائن المواد الخزفية ومعالجتها للوصول للخصائص المطلوبة.
- **الأجهزة Hardware:** حيث يتم نقل ملاط/عجائن 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 و Y و Z، وفوهة الطباعة هي المحور E للبثق.

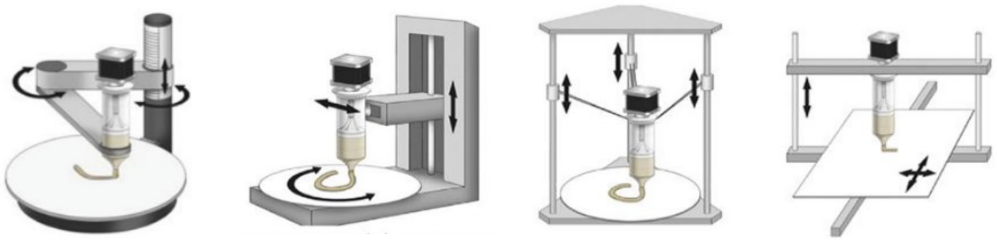
تُصنف أنظمة الحركة للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق، بناءً على التوجيه في مساحة ثلاثية الأبعاد إلى أربع فئات فرعية، شكل (٥)، وهي: (Dhanunjayarao & et.al., 2020, pp. 7-8)، (Kampker & et.al., 2019, p. 816)

أ. **ديكارتي "Cartesian":** عبارة عن ثلاث إحداثيات متعامدة بشكل متبادل XYZ بمساعدة مكون ثلاثي الأبعاد يطبع عن طريق تحديد الموضع الصحيح لاتجاه رأس الطباعة.

ب. **دلتا "Delta"**: تطبق النظام الديكارتي حيث يتم استخدام لوحة بناء دائرية ثابتة وثلاثة أذرع مدعومة بقضبان تحمل رأس الطباعة تتحرك لأعلى ولأسفل.

ج. **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.

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



(أ) (ب) (ج) (د)

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، كما هو موضح في شكل (٦)؛ هذه الأنظمة الثلاث توصف في فئتين هما: المغذيات المنفصلة Separate Feeder والمغذيات المدمجة Integrated Feeder.

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

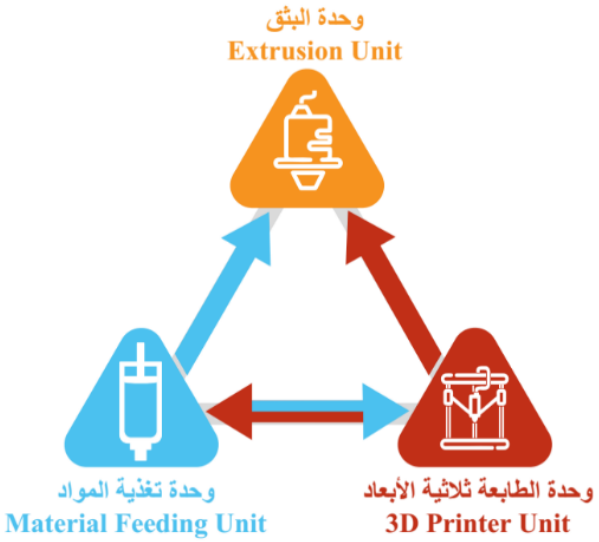
٢. **المغذيات المدمجة Integrated Feeder**: يتم توصيل وحدة التغذية المدمجة بآلية البثق، لتغذية ملاط/عجائن المواد الخزفية مباشرة إلى الفوهة.

الإطار التطبيقي للبحث:

يشمل الجانب التطبيقي للبحث على ثلاث تطبيقات كما يلي:

التطبيق الأول: التصور المقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد:

لتحقيق الفرض الأول من البحث ونصه "**يمكن تقديم تصور مقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد**"، حيث وضع تصور مقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد، وتشمل عملية تصميم الطابعة خزفية ثلاثية الأبعاد، ويشمل على ثلاث وحدات رئيسية مستقلة، لكل وحدة من الثلاث وحدات مكوناتها (الميكانيكية، والإلكترونية) الخاصة ووحدة تحكم خاصة، وتعمل كلا الوحدات بشكل مستقل من حيث الإجراءات والتحكم، وتعمل بشكل متوازي مع إجراءات عملية الطباعة، شكل (٦)؛ ويشمل تقديم التصور المقترح لتصميم طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد مرحلتين، المرحلة الأولى تصميم وحدات الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد، والمرحلة الثانية مقترح بناء الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد ككل.



شكل (٦): وحدات الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد.

تم تصميم الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد باستخدام برنامج Blender وتنفيذ التصميم المقترح للطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد من قبل أعضاء البحث.

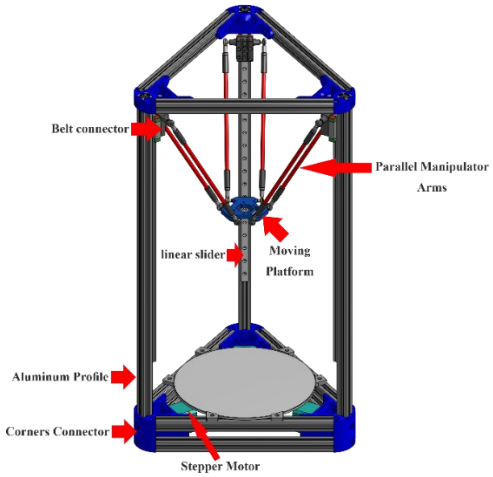
المرحلة الأولى: تصميم وحدات الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد:

أولًا: تصميم وحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد 3D Printer Unit:

ارتكزت منطلقات تصميم وحدة الطابعة ثلاثية الابعاد على نُظم الحركة من نوع دلتا "Delta"، والتي تطبق النظام الإحداثي الديكارتي Cartesian (X,Y,Z) حيث يتم استخدام لوحة بناء دائرية ثابتة وثلاثة أذرع مدعومة بقضبان تحمل وحدة البثق تتحرك لأعلى ولأسفل. وتمر عملية إنتاج وحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد بمرحلتي التصميم والتنفيذ، وفيما يلي تفاصيل وإجراءات كل مرحلة:

(أ) التصميم ميكانيكي Mechanical design:

تحتوي طابعة دلتا ثلاثية الأبعاد النموذجية، شكل (٧)، على ثلاثة أدلة رأسية، على طول كل دليل رأسي، يتحرك المزلاج لأعلى ولأسفل، مدفوعًا بمحرك متصل بحزام متزامن. ويتم توصيل المزلاج بالمنصة المتحركة بواسطة ذراع متوازي بمفصل كروي.



شكل (٧): التصميم الميكانيكي لوحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد.

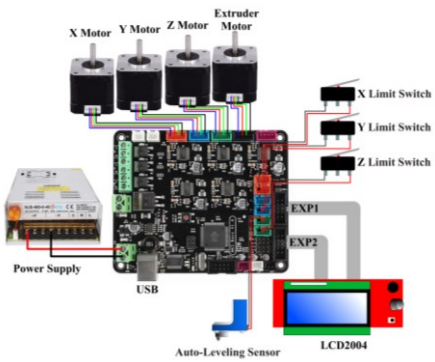
وتشمل المكونات الميكانيكية Mechanical Components لوحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد على الهيكل ونظام الحركة: (أ) مكونات الهيكل Frame Components وتشمل (قطاعات الألمنيوم Aluminum Profile لبناء هيكل الطابعة، موصل الزوايا Corners

Connector لتدعيم وتوصيل هيكل الطابعة)؛ (ب) مكونات نظام الحركة motion components وتشمل (محرك خطوي Stepper Motor لإنتاج القوة الحركية ونقلها بموصل السَير، مزلاج خطي linear slider لتوجيه حركة أذرع المناورة المتوازية، السَير Belt لنقل وتوجيه الحركة من المحرك الخطوي إلى موصل السَير، موصل السَير Belt connector لنقل وتوجيه الحركة من السَير إلى مزلاج خطي وأذرع المناورة المتوازية، أذرع المناورة المتوازية Parallel Manipulator Arms لنقل وتوجيه الحركة من موصل السَير إلى منصة الحركة، منصة الحركة Moving Platform لحمل وتوجيه وحدة البثق.

(ب) التصميم الإلكتروني Electrical Design:

يتم التحكم في حركة المحاور الديكارتية في تصميم وحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد الحالية من خلال برنامج Marlin الثابت على متحكم Arduino Mega. ويتلقى برنامج Marlin الثابت أوامر G-code من برنامج UltiMaker Cura، ويترجمها إلى حركات المحرك الخطوي.

ويتم بناء الدائرة الإلكترونية لوحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد من خلال توصيل المكونات الإلكترونية Electronic Components؛ وفق لما هو موضح في شكل (٨).



شكل (٨): الدائرة الإلكترونية لوحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد.

وتشمل أهم المكونات الإلكترونية Electronic Components لوحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد: مزود الطاقة Power Supply لتزويد لوحة التحكم بالتيار الكهربائي المستمر بجهد

١٢-٢٤ فولت، لوحة التحكم Control Board يتم من خلالها التحكم وتنفيذ عملية الطباعة من طراز MKS Base V1.6 التي تتوافق مع جميع البرامج الثابتة من فئة RAMPS، شاشة التحكم LCD Controller من طراز LCD 2004 وتستخدم لعرض نظام التشغيل والتحكم في تعليمات التشغيل، الكابلات والموصلات cables and connectors لتوصيل شاشة التحكم والمحركات والمستشعرات والآليات الأخرى المدرجة بلوحة التحكم، مستشعر التسوية التلقائي Auto- Leveling Sensor لاستشعار وتحديد القرب لتسوية منصة الطباعة تلقائيًا وقياس ميل سطح الطباعة بدقة، مِفتاح الحد Limit Switch لتحديد ارتفاع مساحة العمل وتحديد نقطة البداية.

(ج) تصميم برمجة التشغيل لوحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد:

تم الاستعانة ببرمجيات مارلين Marlin Firmware، وهي برنامج ثابت مفتوح المصدر Open Source Firmware مصمم في الأصل لمشروع RepRap للطابعات ثلاثية الأبعاد باستخدام برنامج اردوينو Arduino، وتم إنتاج برنامج تشغيل باسم (Ebrahim SVU)، شكل (٩).

برمجية التشغيل

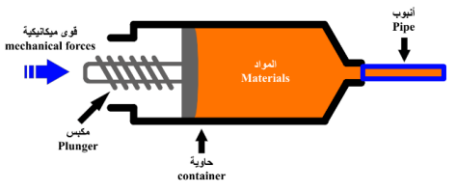
برنامج اردوينو

ببرمجيات مارلين

شكل (٩): متطلبات البرمجة، وبرمجية تشغيل Firmware لوحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد.

ثانيًا: تصميم وحدة تغذية المواد Material Feeding Unit:

ارتكزت منطلقات تصميم وحدة تغذية المواد على نُظم المواد فئة المغذيات المنفصلة Separate Feeder القائمة على البثق بالمكبس Extrusion with Plunger فئة الطارد الميكانيكي Mechanic Extruder، شكل (١٠)،

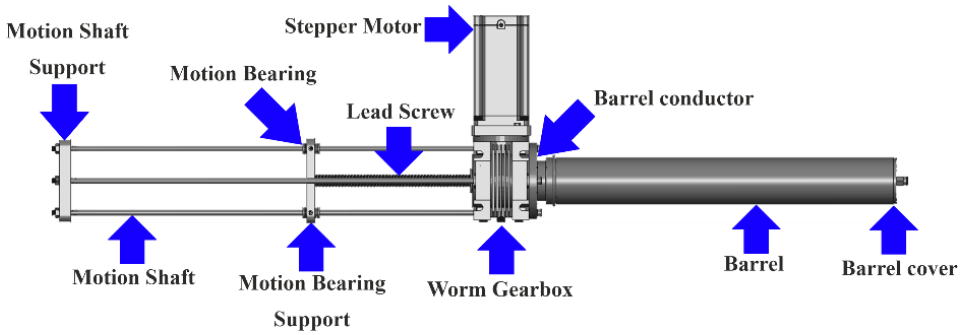


شكل (١٠): نُظم المواد من فئة المغذيات المنفصلة Separate Feeder.

حيث يتم نقل ملاط/عجائن المواد الخزفية من الطارد الميكانيكي إلى وحدة البثق Extrusion Unit عبر أنبوب Pipe من خلال تطبيق قوى ميكانيكية.

(أ) التصميم ميكانيكي Mechanical design:

تحتوي وحدة تغذية المواد النموذجية من فئة الطارد الميكانيكي Mechanic Extruder، شكل (١١)، على ثلاثة أجزاء رئيسية هما: الحاوية، والقوى الميكانيكية، ونقل المواد. حيث تقوم الحاوية بتخزين ملاط/عجائن المواد الخزفية وتنقلها إلى وحدة البثق من خلال الانبوب بواسطة القوى الميكانيكية.



شكل (١١): التصميم الميكانيكي لوحدة تغذية المواد.

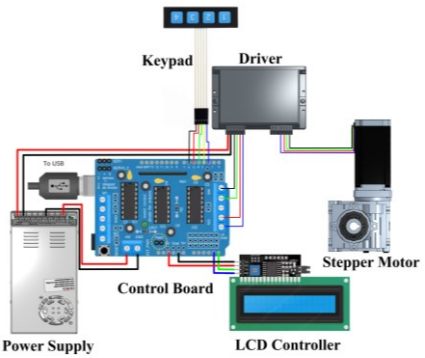
وتشمل المكونات الميكانيكية Mechanical Components لوحدة تغذية المواد على نظام القوى الميكانيكية، ونظام حفظ ونقل المواد: (أ) مكونات نظام القوى الميكانيكية وتشمل (علبة تروس Worm Gearbox لخفض سرعة المحرك بنسبة ٣٠:١، بالإضافة إلى زيادة العزم، محرك خطوي Stepper Motor لإنتاج القوة الحركية، محمل الحركة Motion Bearing لتوجيه للحركة الخطية، عامود الحركة المسنن Lead Screw لتحويل حركة علبة التروس لقوة دفع، دعامة محمل الحركة Motion Bearing Support لتثبيت وربط محمل

الحركة، رمح الحركة Motion Shaft لتوجيه للحركة الخطية لمحمل الحركة، دعامة رمح الحركة Motion Shaft Support لتثبيت رمح الحركة)؛ (ب) مكونات نظام حفظ ونقل المواد وتشمل (الحاوية Barrel لتخزين المواد الخزفية، موصل الحاوية Barrel conductor لتوصيل الحاوية بعلبة التروس، غطاء الحاوية Barrel cover لتغطية الحاوية وتوصيل ودعم موصل الأنبوب، أنبوب مرن Flexible Pipe لنقل المواد الخزفية إلى وحدة البثق، كبّاس غاطس Plunger لدفع المواد الخزفية داخل الحاوية، موصل الأنبوب Pipe fitting لتوصيل الأنبوب المرن بالحاوية).

(ب) التصميم الإلكتروني Electrical Design:

يتم التحكم في سرعة ضخ المكبس في تصميم وحدة تغذية المواد الحالية من خلال برنامج مصمم خصيصًا لإتاحة التحكم في مقدار المواد الخزفية التي يتم ضخها، وتم تصميم البرنامج من خلال برنامج Marlin الثابت على متحكم Arduino Mega.

يتم بناء الدائرة الإلكترونية لوحدة تغذية المواد من خلال توصيل المكونات الإلكترونية Electronic Components؛ وفق لما هو موضح في شكل (١٢).



شكل (١٢): الدائرة الإلكترونية لوحدة تغذية المواد.

وتتمثل أهم المكونات الإلكترونية Electronic Components لوحدة وحدة تغذية المواد (مزود الطاقة Power Supply لتزويد لوحة التحكم بالتيار الكهربائي المستمر بجهد ١٢-٢٤ فولت، لوحة التحكم Control Board يتم من خلالها التحكم وتنفيذ عملية الطباعة،

هذه اللوحة من طراز Arduino Uno R3، شاشة العرض LCD من طراز XRC89 لعرض نظام التشغيل، لوح توسيع حركي Drive Shield من طراز L293D لتخفيض سرعات المحرك، ناقلُ الحركة Driver لضبط ونقل حركة المحرك الخطوي، لوحة مفاتيح Keypad للتحكم في إعدادات التشغيل.

(ج) تصميم برمجة التشغيل وحدة تغذية المواد:

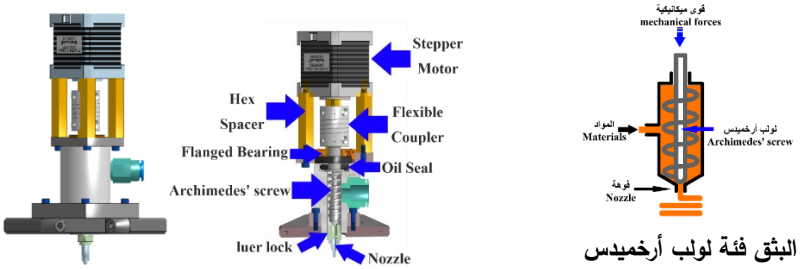
تم الاستعانة ببرمجيات مارلين Marlin Firmware، لتصميم برنامج تشغيل وحدة تغذية المواد باستخدام برنامج اردوينو Arduino. شكل (١٣).

ببرمجيات مارلين　　برنامج اردوينو　　برمجية التشغيل

شكل (١٣): برمجية تشغيل Firmware وحدة تغذية المواد.

ثالثًا: تصميم وحدة البثق Extrusion Unit.

ارتكزت منطلقات تصميم وحدة البثق على البثق بالمكبس Extrusion with Plunger فئة لولب أرخميدس Archimedes' screw، شكل (١٤)، حيث يتم بثق ملاط/عجائن المواد الخزفية من حدة البثق عبر الفوهة Nozzle من خلال تطبيق قوى ميكانيكية ناتجة عن حركة اللولب. وتحتوي وحدة البثق النموذجية من فئة لولب أرخميدس Archimedes' screw، شكل (١٤)، على جزئين رئيسيين هما: الحاوية، والقوى الميكانيكية؛ حيث تقوم الحاوية بتخزين ملاط/عجائن المواد الخزفية وتنقلها إلى الفوهة القوى الميكانيكية التي يطبقها لولب أرخميدس.



البثق فئة لولب أرخميدس　　التصميم الميكانيكي لوحدة البثق

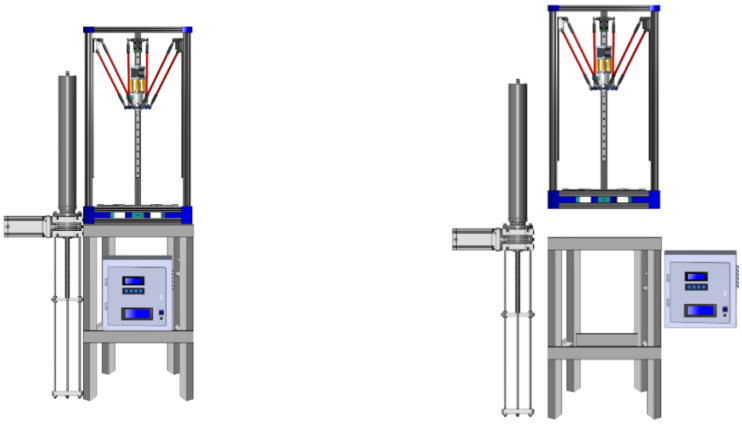
Archimedes' screw.

شكل (١٤): التصميم الميكانيكي لوحدة البثق.

وتشمل المكونات الميكانيكية Mechanical Components لوحدة البثق على (أ) مكونات نظام القوى الميكانيكية وتشمل (محرك خطوي Stepper Motor من نوع Nema 17 لإنتاج القوة الحركية، مقرنة مرنة Flexible Coupler لربط لولب أرخميدس بالمحرك الخطوي، مباعد سداسي Hex Spacer لتثبيت المحرك الخطوي علي هيكل وحدة البثق، جَنَاح الهيكل العلوي Structure Flange لتثبيت كتلة المحرك الخطوي بهيكل وحدة البثق، مُحْمِل ذو حافة Flanged Bearing لضبط وتسهيل وتحميل ووزن حركة لولب أرخميدس، سِدَادة الزيت Oil Seal لمنع تسرب المواد إلى خارج جَنَاح الهيكل، لولب أرخميدس Archimedes' screw: مزج ودفع المواد عبر الفوهة، حلقة دائرية o–ring لمنع تسرب المواد إلى سِدَادة الزيت، مسمار ربط لربط جناح الهيكل مع المباعدات السداسية؛ (ب) مكونات نظام نقل المواد وتشمل (الهيكل Structure تجميع أجزاء وحدة البثق، قفل لور luer lock لتسهيل فك وتثبيت الفوهة بالهيكل، الفوهة Nozzle لضبط خروج المواد حسب السمك المطلوب، موصل الأنبوب Pipe fitting لتوصيل الأنبوب المرن بوحدة البثق، جَنَاح الهيكل السفلي Structure Flange لتثبيت كتلة المحرك الخطوي بهيكل وحدة البثق).

المرحلة الثانية: مقترح بناء الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد ككل:

يتم أولًا تثبيت صندوق لوحة التحكم في هيكل الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد، ثم تثبيت وحدة تغذية المواد على أحد جوانب الهيكل وتثبيتها بالبراغي، ثم تركيب وحدة البثق مع منصة الحركة في وحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد. وأخيرًا يتم تثبيت وحدة الطابعة ثلاثية الأبعاد أعلى الهيكل؛ وفق لما هو موضح في شكل (١٥–أ)، ويوضح شكل (١٥–ب) المحاكاة (3D) للطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد بعد تجميعها.



(ب) (أ)

شكل (١٥): محاكاة (3D) لبناء الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد ككل.

التطبيق الثاني: تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح:

لتحقيق الفرض الثاني من البحث ونصه "**يمكن تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح**"، تم تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصور المقترح، وتشمل عملية تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد بالعديد من إجراءات التنفيذ كالدعم والتمويل، البناء والتشغيل، المشاركات في معارض الابتكار.

(أ). الدعم والتمويل:

مرت عملية الدعم والتمويل بالعديد من الإجراءات منها الدعم المادي من قبل مكتب دعم تسويق ونقل التكنولوجيا والابتكار (تايكو) بجامعة جنوب الوادي وحدة طارد الطين "تغذية المواد" كمشروع بحثي بعنوان "تصميم وتصنيع وحدة طارد الطين للطابعة ثلاثية الأبعاد" بعد موافقة رئيس الجامعة في أكتوبر ٢٠٢٢م، ملحق (١). أما باقي الوحدات المكونة للنموذج المقترح قد تم تمويلها من قبل أعضاء البحث.

(ب). البناء والتشغيل:

تمت إجراءات البناء والتشغيل وفق التصور المقترح، وتتضح تلك الخطوات الخطوات في شكل (١٦):

شكل (١٦): مراحل بناء الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد ذات تحكم فعال.

(ج). المشاركات في معارض الابتكار:

تم المشاركة بالطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في معرض القاهرة الدولي السابع للابتكار "القاهرة تبتكر" في الفترة من ١٣ إلى١٤ فبراير، بالعاصمة الإدارية الجديدة، والذي تنظمه أكاديمية البحث العلمي والتكنولوجيا تحت رعاية السيد رئيس الجمهورية.

وتكللت المشاركة بالطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في معرض القاهرة الدولي السابع للابتكار "القاهرة تبتكر" بحصد مكتب دعم تسويق ونقل التكنولوجيا والابتكار (تايكو) بجامعة جنوب الوادي المركز الثالث كأفضل مكتب دعم تسويق ونقل التكنولوجيا والابتكار (تايكو). (حمدي، ٢٠٢٣)، (رجب، ٢٠٢٣)، ملحق (٢).

التطبيق الثالث: إنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد باستخدام الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المُنفَذة:

لتحقيق فرض البحث الثالث ونصه "**يمكن إنتاج نموذج خزفي معاصر ثلاثي الأبعاد باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة**"، تم تنفيذ نموذج خزفي معاصر ثلاثي باستخدام الطين الأسواني من خلال الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المنفذة، وتشمل عملية إنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد من الطينات المحلية باستخدام الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد على الإجراءات التالية:

المرحلة الأولى: تحضيرات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد:

أولًا: تحضيرات المواد:

يتم نخل الطين الأسواني بمنخُل (425µm mesh) ASTM #40 sieve، وتكرار عملية غسل الطين مرة أخرى، ثم وضع الطين في حوض مصنوع من الجص للتخلص من الماء الزائد وفقاعات الهواء، وتخزن لتعتيق الطين وذلك للحصول على طين قابل للتشكيل.

شكل (١٧): الطين الأسواني.

ثانيًا: تحضير برنامج حساب مسار الطباعة:

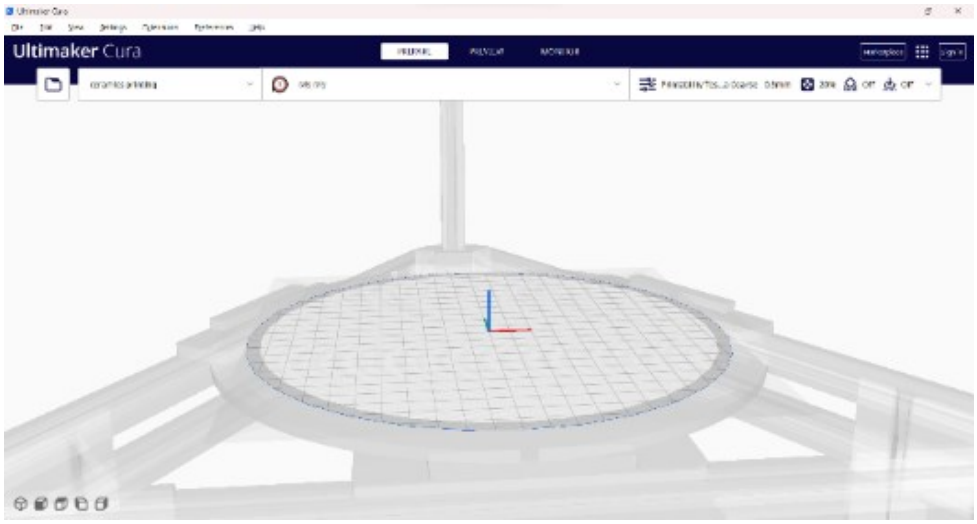
تُعرف عملية حساب مسار الطباعة بناءً على ملف نموذج ثلاثي الأبعاد باسم التقطيع Slicing، ومن أمثلة برامج التقطيع 3D Slicing Software ً واستخدامًا برنامج Ultimaker Cura، شكل (١٨، ١٩).

أ. **إعداد ملف تعريف الطابعة:** يتم إعداد البرنامج لإعداد ملف تعريف الطابعة Printer Profile ثم إدخال تعليمات برمجة G-code.

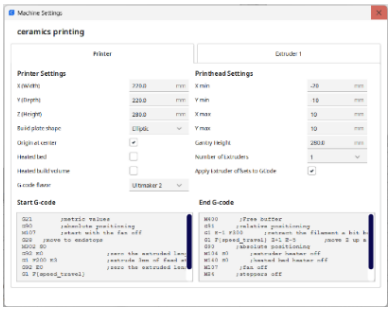
ب. **إعداد ملف تعريف وحدة البثق:** عند إعداد البرنامج لإعداد ملف تعريف وحدة البثق Extruder Profile يتم إضافة أدخل حجم فوهة "Nozzle size".

ج. **إعداد ملف تعريف المادة (الطين):** عند إعداد البرنامج لإعداد ملف تعريف المادة (الطين) Material Profile يتم إضافة فئة مخصصة Custom.

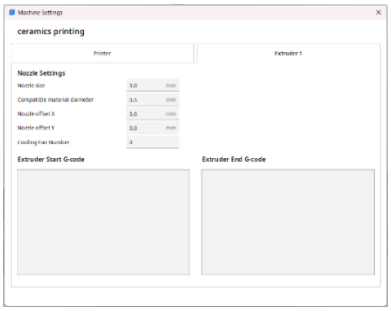
د. **إعداد ملف تعريف الطباعة:** عند إعداد البرنامج لإعداد ملف تعريف الطباعة Print Profile يتم إدخال الإعدادات حسب كل معاملات الطباعة المطلوبة.



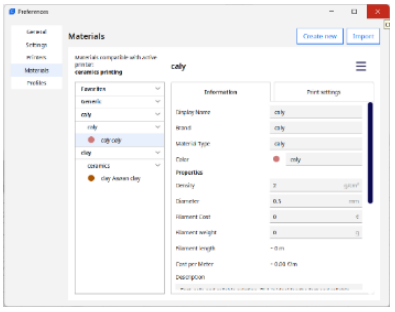
شكل (١٨): برنامج Ultimaker Cura.



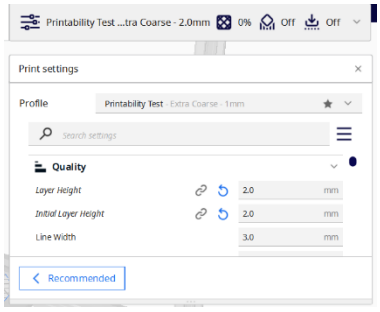
إعداد ملف تعريف الطابعة



إعداد ملف تعريف وحدة البثق



إعداد ملف تعريف المادة (الطين)

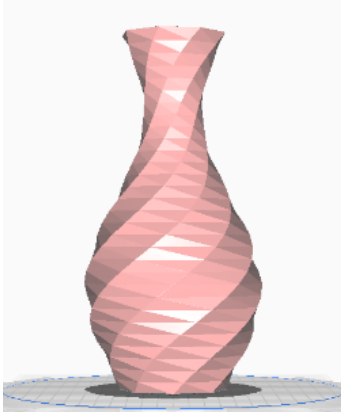


إعداد ملف تعريف الطباعة

شكل (١٩): مراحل تحضير برنامج حساب مسار الطباعة.

ثالثًا: تحضير النموذج:

تم تصميم نموذج خزفي معاصر ثلاثي أبعاد لإناء حلزوني مضلع بقطر ١٠ سم، وارتفاع ٢٠ سم، شكل (٢٠)، من خلال برامج برنامج Blender.



شكل (٢٠): نموذج ثلاثي أبعاد لإناء خزفي حلزوني.

رابعًا: ضبط معاملات الطباعة:

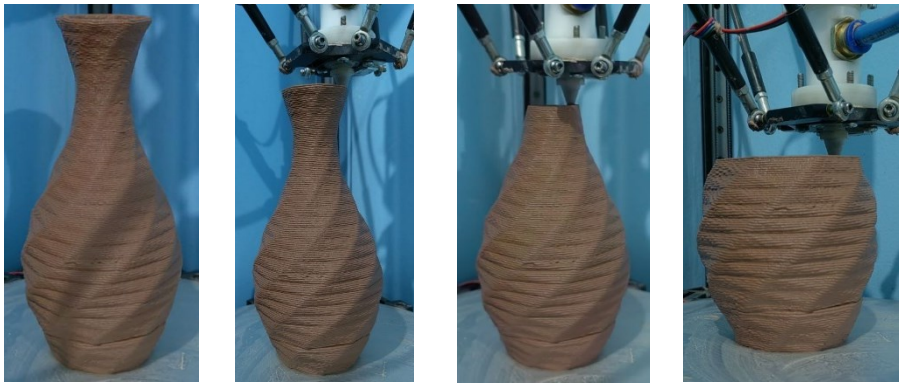
يتم ضبط معاملات الطباعة لإنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد معاصرة باستخدام الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد كما هو موضح في جدول (١).

جدول (١): معاملات الطباعة.

Experiment parameters			
Injector		**Wall Speed (m/s)**	10
Injector Speed	1	**Travel Speed (m/s)**	120
extrusion Setting		**Initial Layer Speed (m/s)**	10
Nozzle (mm)	3	**Initial Layer Print Speed (m/s)**	10
Printing Setting		**Travel**	
Quality		**Enable Retraction**	☑
Layer Height (mm)	1	**Combing Mode**	All
Initial Layer Height (mm)	1	**Z Hop When Retracted**	☑
Line width (mm)	3	**Z Hop Height (mm)**	0.9
Wall line width (mm)	3	**Build Plate Adhesion**	
Initial Layer Line width (%)	100	**Mesh Fixes**	
Walls		**Union Overlapping Volumes**	☑
Wall Thickness (mm)	3	**Merged Meshes Overlap (mm)**	0.15
Wall Line Count	1	**Remove Empty First Layers**	☑
Infill		**Maximum Resolution**	0.5
Infill Density (%)	0	**Special Modes**	
Material		**Surface Mode**	Normal
Wall Flow (%)	100	**Experimental**	
Initial Layer Flow (%)	100	**Use Adaptive Layers**	☑
Speed		**Overhanging Wall Angle (%)**	90
Print Speed (m/s)	10	**Overhanging Wall Speed (%)**	100
Infill Speed (m/s)	10		

المرحلة الثانية: إنتاج النموذج الخزفي ثلاثي الأبعاد:

تم تنفيذ نموذج خزفي معاصرة ثلاثي الأبعاد باستخدام الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد، ويوضح شكل (٢١)، خطوات نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد.



شكل (٢١): خطوات تنفيذ النموذج القياسي للتجربة.

المرحلة الثالثة: المعالجة البعدية للنموذج الخزفي ثلاثي الأبعاد:

تم إجراء المعالجة البعدية للنموذج الخزفي ثلاثي الأبعاد المطبوع باستخدام الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد، وتتمثل إجراءات المعالجة البعدية في التالي:

١. **حرق البسكويت:** تمت عملية الحرق باستخدام فرن كهربائي عند درجة حرارة (1000°C).

٢. **الطلاء الزجاجي:** تم تنفيذ طلاء زجاجي بريق معدني Metallic Luster، باستخدام أكسيد البزموث Bismuth Oxide بنسبة ٧٪ بالوزن مع طلاء زجاجي شفاف لامع جاهز.

وجاءت النتائج كما هو موضح في شكل (٢١).

شكل (٢٢): نتائج المعالجة البعدية للنموذج الخزفي ثلاثي الأبعاد المطبوع.

النتائج:

في ضوء الإطار النظري والجانب التطبيقي للبحث نتخلص النتائج التالية:

١. يمكن تقديم تصور مقترح لتصميم وتنفيذ طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد.

٢. يمكن تنفيذ الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وفق التصميم المقترح.

٣. يمكن إنتاج نموذج خزفي ثلاثي الأبعاد باستخدام الطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد المُنفَذة.

٤. يساعد النموذج المقترح للطابعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في وضع إستراتيجيات تصميمية للمنتج الخزفي، وتنفيذ خزفيات ذات دقة عالية وأكثر تعقيدًا، وكذلك وضع إستراتيجيات لتجريب ومعالجة الطينات المحلية للإنتاج الخزفي.

التوصيات والمقترحات:

في ضوء ما أسفر عنه البحث من نتائج يمكن استجلاء أهم التوصيات والمقترحات التي يمكن أن تسهم في تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وذلك على النحو التالي:

١. إجراء دراسات حول أثر استخدام تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في تحقيق القيم الجمالية والوظيفية للمنتجات الخزفية المطبوعة.

٢. إتاحة تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد داخل العملية التعليمية بكليات الفنون.

٣. دراسة دور استخدام تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في تطوير التفكير البصري والإبداعي لطلاب كليات الفنون.

٤. دراسة فاعلية وجدوى تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد في المشروعات الصغيرة لذوي الاحتياجات الخاصة.

٥. إتاحة تكنولوجيا الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد للحرفين وتوظيفها في إنتاجهم الخزفي.

المراجع

المراجع العربية:

١. حمدي، محمد. (١٧ فبراير, ٢٠٢٣). جامعة جنوب الوادي تحصد ثالث أفضل مكتب لتسويق ونقل التكنولوجيا بمعرض القاهرة. المصري اليوم. تم الاسترداد من https://www.almasryalyoum.com/news/details/2821384

٢. رجب، يوسف. (١٧ فبراير, ٢٠٢٣). جامعة جنوب الوادي تحصد المركز الثالث كأفضل مكتب لتسويق ونقل التكنولوجيا والابتكار. (أحمد صبري، المحرر) صدى البلد. https://www.elbalad.news/5654826

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

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

٥. العامري، محمد حمود. (٢٠١٦). الاتجاهات المعاصرة في التربية الفنية. جامعة السلطان قابوس، كلية الآداب والعلوم الاجتماعية، *مجلة الآداب والعلوم الاجتماعية، مج١, ع١*، ص ٢٣٧.، ص. ٢٢١-٢٤١.

٦. 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.

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

المراجع الأجنبية:

8. 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
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. 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
15. 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

16. 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

17. 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

18. Klusáček, M. (2017). Využití 3D tisku k přípravě pokročilých keramických materiálů. *PhD thesis*. Česko: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

19. Kocovic, P. (2017). *3D Printing and Its Impact on the Production of Fully Functional Components: Emerging Research and Opportunities*. USA: IGI Global.

20. 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

21. 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

22. 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

23. 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.

24. Rafiq, N. (2018). *3D Printing Technology, Applications, and Selection*. UK: Taylor & Francis Group, LLC.
25. Redwood, B., & et.al. (2017). *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam, Netherlands: 3D Hubs B.V.
26. 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
27. Vastamäki, T. (2019). Ceramic technology: how to recognize clay processing. *Master thesis*. Finland: Faculty of Engineering and Natural Sciences, Tampere University.
28. Wohlers, T. & Gornet, T. (2016). *History of Additive Manufacturing*. WOHLERS ASSOCIATES, INC: USA.
29. 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.
30. 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
31. 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

32. Zocca, A. (2015). Additive Manufacturing of Porous Ceramic Structures from Preceramic Polymers. *PhD thesis*. Germany: faculty of Natural and Materials Science, Clausthal University of Technology.