إمكانية استخدام العجينة المصرية القديمة في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد

The possibility of using ancient Egyptian paste in ceramic 3D printing

م.د/ نهلة محمد حامد رشوان
مدرس بكلية الفنون التطبيقية، قسم الخزف، جامعة حلوان
Dr. Nahla Mohamed Hamed Rashwan
Lecturer, Ceramic Department, Faculty of Applied Arts, Helwan University (Egypt)
nahla_rashwan@hotmail.com

ملخص البحث:

اخترع المصريون العجينة المصرية القديمة منذ حوالي ٧٠٠٠ عام وهو أول جسم مزجج صنعه الإنسان، وتعتبر العجينة المصرية القديمة جسم ذاتي التزجج يحتوي على نسب قليلة جدا من الطينات فيصعب تشكيلها بالطرق التقليدية، لذلك كانت تستخدم لعمل قطع الحلي الصغيرة والمنحوتات بالضغط في قوالب (الجعران، فرس النهر ،...وغيرها)، وكجسم ذاتي التزجج تحتوي العجينة المصرية القديمة علي نسبة عالية من السيليكا والمصهرات القلوية عالية الذوبان ومحتوى طيني منخفض حيث تصعد الأملاح القابلة للذوبان من كربونات وبيكربونات الصوديوم والبوتاسيوم إلى السطح أثناء التجفيف، مما يؤدي إلى تكوين طبقة بيضاء ناعمة تشكل البيئة الأساسية للتزجج الذاتي للجسم، وللحصول علي الألوان المصرية القديمة الغنية من الأزرق النيلي إلي التراكواز والأخضر بالدرجات المختلفة تخلط الأكاسيد المعدنية الملونة مع تركيبة الجسم للوصول إلي جسم مزجج بألوان فريدة من خلال حرقة واحدة، بالإضافة إلي ذلك تتميز أجسام العجينة المصرية بأنها تحرق مرة واحدة في درجات حرارة منخفضة حوالي من ٨٥٠إلي ٩٥٠ درجة مئوية حسب تركيبة الجسم في جو مؤكسد. (Net 1)

وتنوعت التطبيقات الخزفية وطرق التشكيل منذ قرون، فمن الأغراض الجمالية إلى التقنيات المتقدمة الحالية استفادت الصناعة من الخصائص المتعددة للخزف مثل: القوة العالية والصلابة والقدرة على تحمل درجات الحرارة العالية ومقاومة التآكل. واستخدمت تقنيات جديدة كالتصنيع بالإضافة (الطباعة ثلاثية الأبعاد) لإنتاج منتجات عالية الجودة، حيث تمكن من إنشاء تصميمات دقيقة ومعقدة هندسيًا لا يمكن تحقيقها بطرق التشكيل التقليدية فمن خلال عملية الطباعة وبناء طبقة تلو الأخرى يمكن التحكم في التصميم من خلال التحكم في تشكيل الخامة. لذا فإن نهج التصنيع بالإضافة فتح الباب لتطبيقات جديدة من ناحية التشكيل والخامة لم تكن موجودة من قبل في مجال الخزف.

فهل يمكن الربط بين التقنيات الحديثة كالطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد والعجينة المصرية القديمة للوصول إلى جسم مطبوع ثلاثي الأبعاد ذاتي التزجيج من عملية حريق واحدة فقط بدلاً من حرقتين، وتبحث التقنيات الحديثة للتصنيع بالإضافة إمكانية تنفيذ النماذج الأولية من المواد المختلفة من خلال مجموعة متنوعة من تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، تركز الأبحاث الحالية في مجال التقنيات الحديثة مثل التصنيع بالإضافة على استخدام مواد وخامات جديدة من خلال الطباعة ثلاثية الأبعاد، ويطور هذا البحث إمكانية استخدام أجسام العجينة المصرية القديمة بإحدى تقنيات التصنيع بالإضافة، فيبحث تركيبة مقترحة لجسم العجينة المصرية وإمكانية تشكيلها بالطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد من خلال البثق نظرا لصعوبة تشكيلها بالطرق المعتادة، وبذلك يتمكن الخزافين والمصممين من تشكيل وطباعة نماذج خزفية ثلاثية الأبعاد من أجسام العجينة المصرية القديمة ذاتية التزجج من حرقة واحدة بالإضافة إلي درجاتها اللونية الغنية.

مشكلة البحث:
- إمكانيات تشكيل العجينة المصرية القديمة من خلال التقنيات الحديثة للتصنيع بالإضافة.

هدف البحث:
- الوصول إلى تشكيل وطباعة نماذج خزفية ثلاثية الأبعاد من أجسام العجينة المصرية القديمة ذاتية التزجج.

فروض البحث:
- إمكانيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد باستخدام العجينة المصرية القديمة لتكون بداية لتطوير العملية لتوافق التطبيقات الإبداعية في الفن والتصميم.
- تطوير جسم مقترح من العجينة المصرية القديمة ذاتية التزجج في حرقة واحدة لتكون قابلة للطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد.
- استخدام الجانب التطبيقي لاختبار وتقييم إمكانيات ونتائج الطباعة.

منهجية البحث:
يعتمد البحث على المنهج التجريبي التحليلي فمن خلال تجارب الجانب التطبيقي يتم التحليل للوصول إلى نتائج أفضل.

الكلمات المفتاحية:
- الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد – العجينة المصرية القديمة – الأجسام المتزججة ذاتيا.
-

- Abstract

The Egyptians invented the ancient Egyptian paste about 7000 years ago and it was the first self-glazed ceramic body in history, how we can link advanced technology like additive manufacturing with ancient Egyptian paste to get ceramic 3D printing self-glazed body in one fire.

The ancient Egyptian paste is considered a self-glazed body with a very low content of clays so it is hard to be formed, in ancient civilization it was used to make small ornaments and sculptures by pressing in moulds (hippo, beetle, ….etc), and as a self-glazed ceramic body, the ancient paste contains a high content of silica and soluble alkaline salts of sodium carbonate, sodium bicarbonate and potassium carbonate, that migrates to the surface during drying, forming a fine white powder. This scum melts during firing to form a vitreous surface and a highly glassy substructure of the body. The colouring metal oxides mixed with the body composition to make rich colours with different shades like blue, turquoise and green. In addition to that, the ancient Egyptian paste considered as high strength body, although it is fired at low temperatures around 850 to 950 Celsius degrees, depending on the body composition in an oxidizing atmosphere.

Ceramic applications and modelling methods have varied for centuries, from aesthetic purposes to today's advanced ceramic technology (high strength, hardness, thermal shock and resistance to corrosion). New technologies such as Additive manufacturing were used to produce high-quality products with geometrically complex designs and precise dimensions that cannot be achieved by traditional modelling methods. In the ceramic 3D printing process (layer-by-layer construction) the design can totally controlled by shaping the material.

Therefore, the additive manufacturing approach opened the door to new applications for forming materials that did not exist before in the ceramic field.
Advanced technologies like additive manufacturing concentrate on how to make prototypes from different materials through a variety of 3D printing techniques, Current researches in this field focus on how to use new materials through 3D printing, and this research develops the possibility of using ancient Egyptian paste bodies in one of the additive manufacturing techniques, as examines a proposed body composition of Egyptian paste and the possibilities of forming it by ceramic 3D printing due to the difficulty of forming in traditional ways. This enables potters and designers to create and print 3D ceramic models of ancient Egyptian self-glazed bodies from once fire, in addition to their unique colours.

Research Problem:

-Possibilities of using the ancient Egyptian Paste through advanced techniques like additive manufacturing.

Research Objective:

Forming and Printing ceramic 3D models of ancient Egyptian paste.

Key Words:
Ceramic 3D printing - Ancient Egyptian Paste - Self-glazed bodies.

مقدمة:

العجينة المصرية القديمة هو نوع من الأجسام الخزفية القديمة اخترع في مصر والشرق الأدنى حوالي الألفية الخامسة قبل الميلاد، تتكون العجينة المصرية القديمة من الكوارتز أو الرمل مطلي بطبقة من الطلاء الزجاجي القلوي، وعلى عكس الخزف التقليدي القائم علي وجود حرقتين الأول للجسم و الثاني للطلاء الزجاجي، فإن العجينة المصرية القديمة تحتاج لحرقة واحدة فقط حيث يحدث تفاعل للمواد الخام بداخل الجسم لينتج جسم ذاتي التزجج، مما يجعلها أول تقنيات خزفية فريدة ومتقدمة نسبيا، وعلى عكس معظم الأجسام الخزفية فإن العجينة المصرية محتواها الطيني قليل جدا أو منعدم تتكون بشكل رئيسي من السيليكا مع الكالسيوم والصوديوم وتتميز بأنها جسم خزفي متزجج بألوان فريدة (الأزرق والأخضر والتركواز والفيروزي) بالإضافة إلى ذلك فإن التركيبة الفريدة تحرق مرة واحدة.

صورة رقم (١) توضح فرس النهر، المملكة الوسطي، الأسرة: ١٢، حوالي 1878-1961 قبل الميلاد، مصر الوسطى ، منير ، القبر B3 الخاص بالمرشح سنبي الثاني ، اكتشف ١٩١٠، مصنوع من العجينة المصرية القديمة، اللون: تركواز ، الأبعاد: ٢٠ سم، الطول ٧.٥ سم، ارتفاع ١١،٢ سم. (Net 2)

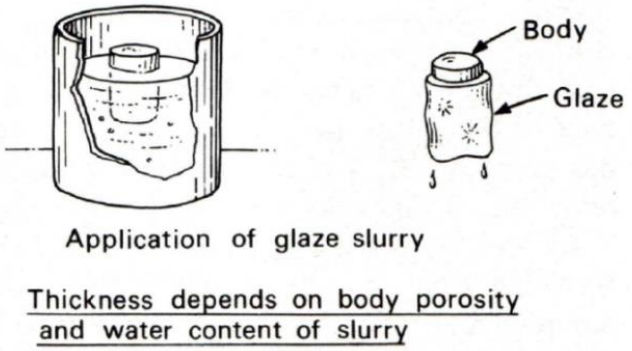
ويشير مصطلح التزجج الذاتي إلى كون الطلاء الزجاجي لم يطبق بشكل مباشر على الجسم الخزفي، ولكن يحدث نتيجة تفاعل تركيبة الجسم والمعالجة الحرارية، وتعتمد طرق التزجج الذاتي على نظام اختراق المواد المسببة للتزجج لسطح جسم العجينة المصرية القديمة أثناء الحريق، وهناك ثلاث تقنيات رئيسية للعجينة المصرية القديمة وهم: **تطبيق الطلاء الزجاجي، التغطية بمسحوق الطلاء الزجاجي، الإزهار.** (Zahed Tajeddin,2015, p.20)

وتعد الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد للسيراميك أحدث اتجاه في تصنيع وتشكيل المجسمات الخزفية المعقدة حيث تتيح تقنيات التصنيع بالإضافة التحكم في خصائص المواد الأولية وعملية الطباعة مما يجعلها من التقنيات المناسبة لتشكيل أجسام ذات مواصفات خاصة مثل العجينة المصرية القديمة التي يصعب تشكيلها نظرا لقلة محتواها الطيني مما يجعل قابلية تشكيل الخامة صعب جدا.

تقنيات العجينة المصرية القديمة:

تقنية تطبيق الطلاء الزجاجي: Application

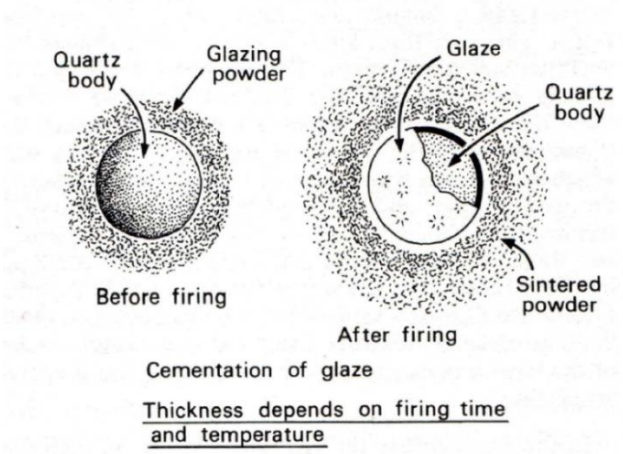
تقنية التطبيق كان يُعتقد سابقا أنها الطريقة الوحيدة للتزجج للعجينة المصرية القديمة، وهي طريقة يتم فيها تطبيق طبقة من معلق سميك يتكون من الماء والسيليكا وأملاح الجير والقلويات على جسم الكوارتز وتعتمد سمك هذه الطبقة على مسامية جسم الكوارتز والمحتوي المائي للمعلق، ثم يحرق الجسم لتشكل هذه الطبقة التزجج الذاتي لجسم الكوارتز، ويجب ألا تخترق هذه الطبقة مساحة كبيرة من الجسم لأن ذلك قد يتسبب في جعل الجسم مشبع بالماء وقابل للتفتت. **(Nicholson, 1993)**



رسم توضيحي رقم (١) يوضح تقنية تطبيق الطلاء الزجاجي للعجينة المصرية القديمة Application

تقنية التغطية بمسحوق الطلاء الزجاجي: Glaze Cementation

تعتمد هذه التقنية على تغطية أو دفن جسم الكوارتز داخل مسحوق طبقة الطلاء الذي يحتوي علي كربونات الصوديوم والبوتاسيوم ويفضل البوتاسيوم لأنه يعمل بشكل أفضل مع السيليكا كمصهر، ثم يحرق الجسم وهو مدفون داخل طبقة المسحوق ويحرق عند درجة ١٠٠٠ درجة مئوية بمعدل حريق طويل يصل إلي ١٢ ساعة ثم تبريد في حوالي ١٢ ساعة أخري، عادة ما تكون طبقة التزجج الذاتي رقيقة، لأن الأملاح تخترق السطح الخارجي فقط أثناء الحريق.
(Wulff, H. E., 1968, p. 107)



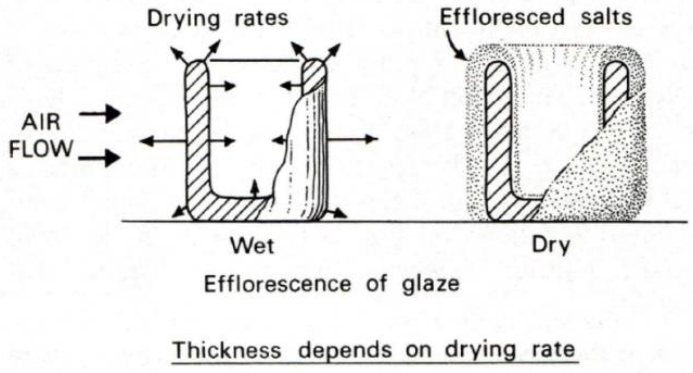
رسم توضيحي رقم (٢) يوضح طريقة التغطية بمسحوق الطلاء الزجاجي للعجينة المصرية القديمة

تقنية الإزهار: Efflorescence

هذه التقنية المستخدمة في الجانب التطبيقي من البحث، وكانت الطريقة النموذجية للتزجيج خلال عصر الدولة القديمة. ويحدث التزجج الذاتي في تقنية الإزهار من خلال أملاح قابلة للذوبان من كربونات الصوديوم والبوتاسيوم والكبريتات والكلوريدات، حيث تخلط مع تركيبة الجسم من الكوارتز المطحون والقلويات ثم يضاف ماء التشكيل، وأثناء مرحلة الجفاف تخرج الأملاح وتتبلور مكونة طبقة كثيفة علي سطح الجسم، وتُعرف هذه العملية باسم الإزهار.

وعلي عكس طريقة التغطية بمسحوق الطلاء الزجاجي فيفضل استخدام أملاح الصوديوم علي البوتاسيوم بسبب انخفاض قابليتها للذوبان بشكل ملحوظ، وأثناء الحريق تتفاعل الأملاح المترسبة علي السطح مع السيليكا لتشكل الطلاء الزجاجي الذي يعتمد سمكه على وقت التجفيف، حيث أن التجفيف السريع يؤدي إلى طلاء زجاجي أكثر سمكًا، ويحتوي جسم العجينة المصرية القديمة الناتج بطريقة الإزهار على دقائق متزججة كبيرة بسبب الأملاح القلوية التي فشلت في الوصول إلى السطح، ويكون هذا التأثير أكثر وضوحًا عند استخدام الكوارتز ذات النعومة الخشنة في تركيبة الجسم.

(Elyssa Iris Okkelberg, 2011, p.10)



رسم توضيحي رقم (٣) يوضح طريقة الإزهار للعجينة المصرية القديمة

طرق تشكيل العجينة المصرية القديمة:

يصعب تشكيل أجسام العجينة المصرية القديمة مقارنة بالأجسام الخزفية الأخرى، ففي الأجسام التقليدية تلعب شكل وحجم معادن الطينات الدور الرئيسي في التشكيل حيث تنزلق الصفائح السداسية وتندمج عند إضافة الماء فيسهل تشكيلها، وعلى النقيض من ذلك العجينة المصرية القديمة لأن جزيئات السيليكا الموجودة في أجسام العجينة المصرية القديمة ذات زاويا حادة، مما يعيق سهولة الحركة عند إضافة الماء والتشكيل حيث يمكن تصنيف العجينة المصرية القديمة على أنها مادة غير نيوتونية، مما يعني أنها ذات لدونة غير ثابتة. وبشكل أكثر تحديدًا، فهي متغيرة الانسيابية لأن لدونتها تتناقص بمرور الوقت عندما تخضع لمعدل قص ثابت، لذلك فمن الصعب تشكيلها لأنها عرضة لفقدان التفاصيل إذا تم تشكيلها بالطرق التقليدية أو بسرعة.(Griffin, P. S., 2002, p. 323)

فلابد من تشكيلها بنفس الطريقة التي يتم التعامل بها في المنحوتات الرملية باستخدام التشكيل اليدوي والأدوات البسيطة وكانت معظم الأشكال صغيرة الحجم مثل المنحوتات والتماثيل والخرز، وكان يستخدم أيضا أدوات حادة للنحت والكشط والزخرفة.

صورة رقم (٢) توضح طوق واسع من المملكة الوسطى، الأسرة ١٢، عهد أمنمحات الأول، حوالي ١٩٨١-١٩٧٥ قبل الميلاد، صعيد مصر، طيبة، جنوب أساسف، مقبرة واه، مومياء، واكتشف ١٩٢٠. خرز صغير مصنوع من العجينة المصرية القديمة ومجمع بخيط من الكتان، اللون: فيروزي، ارتفاع ٣٤,٥ سم، عرض ٣٩ سم. متحف متروبوليتان للفنون، نيويورك.(Net 3)

واستخدم الكبس في القوالب للحصول على الأشكال المطلوبة وكان يفضل استخدام قوالب غير مسامية حتى لا تمتص جزء من الخامات وخصوصا الأملاح الموجودة داخل تركيبة الجسم فتكون نتائج التزجج الذاتي غير جيدة، وبعد عدد مرات من الكبس إذا تأثرت مسامية القالب كان يتم استبداله.

بالنسبة للأحجام الكبيرة مثل الأواني، كانت التقنية النموذجية هي تشكيل على قلب من القش أو بعض المواد النباتية الأخرى، والتي تعمل داعم عضوي مؤقت ويحترق ويتطاير أثناء الحريق، كانت هناك تقنية أخرى لصنع القطع الكبيرة تتمثل في تقسيمها إلى أجزاء تشكل عن طريق القوالب ثم باستخدام معلق ثقيل من العجينة المصرية القديمة كمادة لاصقة يتم تجميع الأجزاء معا لعمل القطع الكبيرة، ويعتبر صولجان لأمنحتب الثاني الذي يبلغ طوله ٢,١٥٨ متر، وهو من أكبر القطع الخزفية من العجينة المصرية القديمة التي شكلت بهذه الطريقة.

صورة رقم (٣) لصولجانًا أو عصا طقسية من العجينة المصرية القديمة ذات درجات من اللون الأزرق، المملكة الحديثة: الأسرة الثامنة عشر، عهد أمنحتب الثاني، الوزن: ٦٥,٠ كيلوجرام ارتفاع: ٢١٥,٩ سم عرض: ٢٥,٠ سم عمق: ٤٨,٢ سم، متحف فيكتوريا وألبرت(Net 4)

وقد تم استخدام دولاب الخزاف لصنع الأواني خاصة في المملكة الحديثة، وكان يضاف إلى جسم العجينة المصرية القديمة نسب أكبر من الطينات لزيادة اللدونة حتى يمكن تشكيلها على دولاب الخزاف ولكن كان ذلك يؤثر علي تزجج الجسم و اللون.

حريق العجينة المصرية القديمة:

يتم حريق العجينة المصرية القديمة بشكل عام عند درجات حرارة ٨٠٠-١٠٠٠ درجة مئوية في دورة حريق بطيئة، وكلما ارتفعت درجات الحرارة أدي ذلك إلى إنتاج طبقة زجاجية أكثر نعومة تغلغلت أكثر في الجسم، وعلى عكس الحريق الأول للأجسام الخزفية يجب مراعاة عدم التصاق القطع مع بعضها أو في الفرن نظرا لكونها جسم متزجج.

(Elyssa Iris Okkelberg, 2011, p.8-13)

الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد:

الطباعة ثلاثية الأبعاد هي اسم شائع يطلق على مجموعة من تقنيات التصنيع بالإضافة التي تنتج المجسمات، وتستخدم الطباعة ثلاثية الأبعاد كأسلوب للنمذجة الأولية وكانت ولا تزال وسيلة فعالة للغاية لاختبار وتقييم المنتجات قبل الالتزام بتقنيات الإنتاج الضخم الأكثر تكلفة. ولاتزال النماذج الأولية تطبيقًا رئيسيًا للطباعة ثلاثية الأبعاد، ولكن هناك المزيد من التطبيقات نظرًا للتطورات في المواد وقدرات الماكينات.(Zahed Tajeddin, 2015, P.1)

تعتبر الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد الخزف من الاتجاهات الحديثة في تشكيل الخزف، حيث تمكن من عمل أشكال معقدة من خلال التقنيات المختلفة للطباعة ثلاثية الأبعاد، تتضمن تقنيات الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد الأكثر شيوعا على أنظمة سائلة أو شبه سائلة مضافا إليها خامات خزف مطحونة طحن ناعم جدا لتكون في شكل أحبار أو معاجين، ويمكن طباعة الأجسام الخزفية إما عن طرق البثق، نفث المواد الرابطة، البلمرة الضوئية، أو تلبيد المسحوق.

(Zhangwei Chen, 2018, p221)

تُفضل تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد القائمة على البثق في مجال الخزف نظرًا لسهولة الاستخدام، وانخفاض التكلفة، والاستخدام الأمثل للخامات وعدم إهدارها، والقدرة الجيدة على التغيير في قابلية التشغيل للخامات الخزفية المختلفة، ويعتمد الجانب التطبيقي علي دراسة إمكانية طباعة العجينة المصرية القديمة من خلال تقنية البثق في الطباعة ثلاثية الأبعاد، وتعتمد تقنية البثق في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد على بناء طبقات واحدة تلو الأخر من خلال معلومات النموذج رقمي المنتج من خلال البرامج الثلاثية الأبعاد.

وتمنح الأجسام الخزفية كخامات طبيعية أفاق جديدة للإبداع من خلال الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد، فالاختلاف في تراكيب الأجسام الخزفية يجعلها تختلف في إمكانية ومميزات طباعتها بالإضافة إلى نوع الطابعة وطريقة عملها، فتوفر الطباعة ثلاثية الأبعاد إمكانية إنشاء نماذج ذات أشكال هندسية معقدة يصعب أو حتى من المستحيل إنتاجها باستخدام تقنيات التشكيل التقليدية. فيمكن باقتران عملية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد بالعجينة المصرية القديمة التي يصعب تشكيلها إنشاء أشكال غير مسبوقة بالطرق التقليدية. (Fuwen Hu, 2021)

الجانب التطبيقي:

يبحث هذا الجانب إمكانية تطوير أجسام خزفية ذاتية التزجج من العجينة المصرية القديمة تصلح لتقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد من خلال تقنية البثق، وإجراء بعض القياسات العملية للوصول إلي الخصائص مرغوب فيها لإمكانية الطباعة والاختلاف بعض الحريق.

بعض العوامل الاختبار التي يمكن من خلالها تحديد إمكانيات طباعة العجينة المصرية القديمة من خلال البثق:

1- تعيين نسبة إضافة الماء إلى تركيبة جسم العجينة المصرية القديمة المقترحة ليمكن طباعتها.

2- قياس الضغط أو القوة المطلوبة لبثق تركيبة جسم العجينة المصرية القديمة المقترحة من من خلال فوهة الطابعة.

3- قياس نسبة الانكماش لتركيبة جسم العجينة المصرية القديمة المقترحة عند الجفاف، وبعد الحريق عند ٩٥٠ درجة مئوية تقريبا.

الخامات المستخدمة في الجانب التطبيقي:

كانت التركيبة التقليدية للعجينة المصرية المستخدمة في الحضارة المصرية القديمة هي ٩٢-٩٩٪ سيليكا (SiO_2) ،١-٥٪ أكسيد كالسيوم (CaO)، و٠-٥٪ أملاح قلوية، مثل الصودا (Na_2O) أو البوتاس (K_2O)، وقد يحتوي الجسم أيضًا على كميات أقل من أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) والحديد أكسيد (Fe_2O_3)، أكسيد الماغنيسيوم (MgO) ، أكسيد النحاس (CuO) ، وأكسيد البوتاسيوم (K_2O) مع كميات ضئيلة جدا من العناصر الأخرى، وفي تراكيب جسم قليلة جدا ، وقد يضاف الطين كملدّن لتسهيل عملية التشكيل. (Elyssa Iris, 2011, p.5)

وتتكون العجينة المصرية القديمة من ثلاث خامات وهي: (السيليكا- كربونات وبيكربونات الصوديوم – الفلسبار الصوديومي)، ولجعل هذه الخامات تناسب الطباعة ثلاثية الأبعاد تم إضافة كل من (طينة الكرة – البنتونيت)، واستخدمت كل من الملونات الآتية: (أكسيد الكوبلت- كربونات نحاس – أكسيد كروم).

السيليكا:
السيليكا هي الخامة الرئيسية المستخدمة في العجينة المصرية القديمة مثل: الكوارتز أو الفلنت وسوف يتم استخدام الكوارتز في الجانب التطبيقي، وكلما كان الحجم الحبيبي أصغر تكون نتيجة التزجج أفضل، نظرًا لأن الحبيبات الأصغر تميل إلى أن تتفاعل بشكل أفضل، كما الحجم الحبيبي الصغير يناسب الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد بشكل كبير خاصة في تقنية البثق لمنع حدوث انسداد لأي جزء من أجزاء الباثق خاصة الفوهة، وفي التركيبة المقترحة استخدم الكوارتز بنسبة ٣٨% وبنعومة 40 ميكرون.

كربونات الصوديوم وبيكربونات الصوديوم:
وتعتبر كربونات أو بيكربونات أو كلوريد الصوديوم أملاح قلوية قابلة للذوبان، وهو تشكل الأملاح التي تتكون على السطح أثناء الجفاف لتكون الطبقة المزججة بعد الحريق وتختلف لونها تبعا للأكسيد الملون المستخدم أو الصبغة، وفي التركيبة المقترحة تستخدم كربونات الصوديوم بنسبة ٦% وبيكربونات الصوديوم بنسبة ٦%.
(Zahed Tajeddin, 2015, P.14)

الفلسبار الصوديومي:
يستخدم الفلسبار الصوديومي بشكل عام في الأجسام الخزفية كمصهر لأنه يعمل على زيادة الانصهار في درجات حرارة المتوسطة والعالية ويستخدم بشكل أساسي كمصدر للقلويات، وفي أجسام العجينة المصرية القديمة يزيد من عملية التزجج من خلال العمل على انصهار السيليكا وزيادة التفاعل بين المكونات، وفي التركيبة المقترحة استخدم الفلسبار الصوديومي بنسبة ٣٨%.(Net 5)

طينة الكرة:
تتميز طينة الكرة بحجم حبيبي دقيق لذلك تتميز بلدونة عالية مع قوة خضراء ممتازة، ولون جيد بعد الحريق، وتضاف بنسب قليلة لزيادة لدونة تركيبة جسم العجينة المصرية القديمة لتناسب البثق في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد، وفي التركيبة المقترحة استخدم طينة الكرة بنسبة ١٢%.(Net 6)

البنتونيت:
يتميز البنتونيت بحجم حبيبي صغير جدا فهي أنعم ١٠ مرات من طين الكرة، وبالتالي تزيد مساحة السطح ويزيد معها نسب الماء المضاف للجسم مما يجعلها أكثر خامة شائعة لزيادة اللدونة في الخزف، ويضاف إلى الطينات بنسب مختلفة حوالي تبدأ من ٠,٣ %. ويعتبر البنتونيت مادة غير نقية نظرًا لاحتوائها على نسبة عالية من حديد بالتالي تؤثر على اللون في الجسم، وفي التركيبة المقترحة استخدم بنسبة عالية ٥% لزيادة اللدونة لتركيبة الجسم لتناسب البثق في الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد.(Net 7)

الأكاسيد الملونة:
يضاف إلى المواد الخام السابق ذكرها أكاسيد معدنية للتلوين اعتمادًا على تركيبة جسم العجينة المصرية القديمة، فمثلا أكسيد النحاس CuO ينتج مجموعة من الألوان بين الأزرق والأخضر وعند إضافة أكسيد الكالسيوم كملح ينتج "الأزرق المصري" ($CaO \cdot CuO \cdot 4\ SiO_2$)، وتنتج النسب المختلفة من النحاس وأكسيد الكالسيوم درجات من الأزرق المشبع، وأكسيد الحديد ينتج درجات من بني إلى أحمر، وأكسيد الكوبالت لدرجات الأزرق الداكن والأنتيمون للحصول

علي درجات الأصفر، وكان يستخدم أكسيد المنجنيز للحصول علي اللون الأسود شائع في الاستخدام للكتابة الهيروغليفية والأنماط والوحدات الزخرفية الأخري. (Elyssa Iris Okkelberg, 2011, p.5,6)

وفي التركيبة المقترحة رقم ١ استخدم أكسيد الكروم بنسبة ١% للحصول على اللون الأخضر، وفي التركيبة رقم ٢ استخدم كربونات النحاس بنسبة ٣% للحصول على درجة من درجات التركواز، في التركيبة رقم ٣ استخدم أكسيد الكوبلت بنسبة ٠,٧ % للحصول علي اللون الأزرق، كما يوضح الجدول رقم ١:

جدول رقم ١: النسب المئوية لتركيبة مقترحة لجسم العجينة المصرية القديمة

الخامات المستخدمة	تركيبة ١%	تركيبة ٢%	تركيبة ٣%
فلسبار صوديومي	٣٨	٣٨	٣٨
كوارتز	٣٨	٣٨	٣٨
طينة كرة	١٢	١٢	١٢
كربونات صوديوم	٦	٦	٦
بيكربونات صوديوم	٦	٦	٦
بنتونيت	5	5	5
أكسيد الكروم	١	-	-
كربونات نحاس	-	٣	-
أكسيد كوبلت	-	-	0.7

إعداد وتحضير التركيبة جسم العجينة المصرية القديمة:

1- نخل جميع الخامات ثم وزن حوالي ٥٠٠ جرام من كل تركيبة.

2- ثم إضافة الماء نسبة ١٥%، ٢٠%، ٢٥%، وكانت نسبة ١٥% قليلة جدا لا تمكن خلط الجسم بشكل جيد، ثم نسبة ٢٠% كانت جيدة، ونسبة ٢٥% كانت كثير حيث جعلت الجسم في حالة أقرب إلى سيولة نظرا لاستخدام البنتونيت بنسبة عالية ٥%.

3- وخلط التركيبة رقم ٣ جيدا بالماء، واستخدامها لطباعة العينة الأولية.

تشكيل العجينة المصرية القديمة بالطابعة ثلاثية الأبعاد:

1- عمل عينة مبدئية لمعرفة هل يمكن بثقها، وكانت العينة على شكل أسطوانة ٥*١٠سم.

2- وجدت صعوبة في البثق وكان معدل خروج جسم العجينة من فوهة الطابعة بطيء جدا، نظرا لأن الجسم يحتوي على مواد غير لدنة بنسب كبير تصل إلى ٨٨%، تم تنظيف أجزاء الطابعة واستخدم مواد تشحيم لجميع أجزاء الباثق وخصوصا فوهة الطباعة.

3- ثم خفض سرعة الماكينة أثناء الحركة لتتوافق مع البثق البطيء لجسم العجينة المصرية أثناء الطباعة، وإعادة محاولة الطباعة مرة أخري.

4- تم استخدام ضغط هواء حوالي ٣ إلى ٥ بار، فحين أن الطينات اللدنة تحتاج إلي حوالي ٢ إلى ٤ بار.

5- تم بثق الجسم وطباعته على شكل أسطوانة ٥*١٠سم، في زمن حوالي ٥ دقائق.

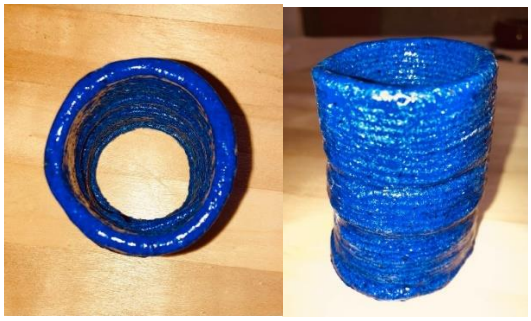
6- قياس نسب الانكماش الطولي حيث إن الطول بعد التشكيل ١٠ سم، وبعد الجفاف ٨,٥ سم، وبعد الحريق ٥.٧ سم، فنتيجة للتزجج وحدوث انصهار جزئي للخامات تظهر نسب الانكماش عالية.

جدول رقم ٢: يوضح بعض عوامل الاختبار ومحددات التشغيل للعينة الأولي

العينة الأولي	الأبعاد (سم)	نسبة الماء %	ضغط الهواء (بار)	زمن الطباعة (دقيقة)	نسبة الانكماش بعد الجفاف %	نسبة الانكماش بعد الحريق %
تركيبة رقم ٣	٥ * ١٠	٢٠	٤-٣	٥	١٥	٢٥

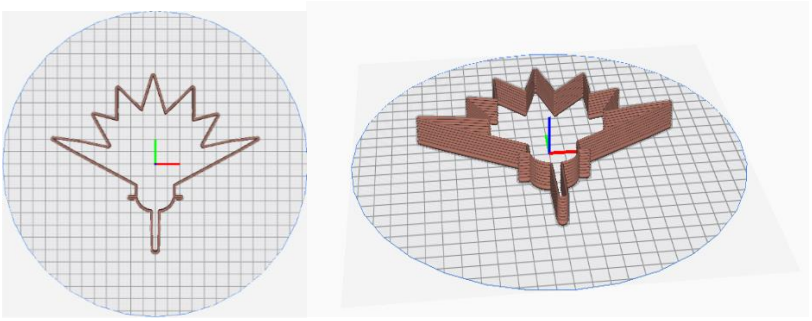
صورة رقم (٤) توضح العينة أثناء الطباعة

صورة رقم (٥) توضح العينة بعد الطباعة ثم الجفاف وظهور أملاح كربونات وبيكربونات الصوديوم علي سطح الجسم

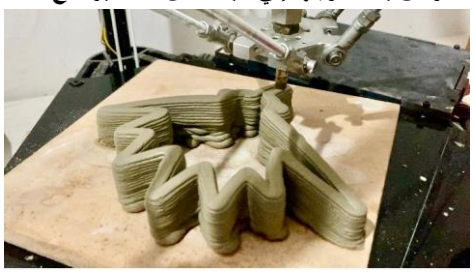


صورة رقم (٦) توضح العينة من التركيبة رقم ٣ بعد الحريق عند درجة حرارة ٩٥٠°م وبمعدل حريق بطيء حوالي ١٣٠ °م كل ساعة، ويتضح اختفاء جزئي لطبقات الطباعة وجود انحراف في الخطوط المستقيمة مع الارتفاع في الطبقات خاصة بعد الحريق نظرا لتزجج الجسم وحدوث انصهار جزئي للخامات

وبعد الوصول إلى نسبة الماء وضغط الهواء خلال استخدام تجريد لخطوط زهرة اللوتس التي تعتبر من أهم الرموز الدينية والدنيوية وأكثرها شيوعًا في مصر القديمة، وأكثرها دلالة على الجمال والحياة والبعث. وتم طباعة بحجمين الأول: ١٨* ١٤*٥ سم طبعت في زمن حوالي ٢١دقيقة و٣٧ثانية، الحجم الثاني: ٧*٨*٢ سم وطبعت في زمن حوالي ٥ دقائق.



صورة رقم (٧) توضح تصميم لزهرة اللوتس بعد تحويلها إلي طبقات من خلال برنامج Cura لعمل G-code تجهيزا للطباعة

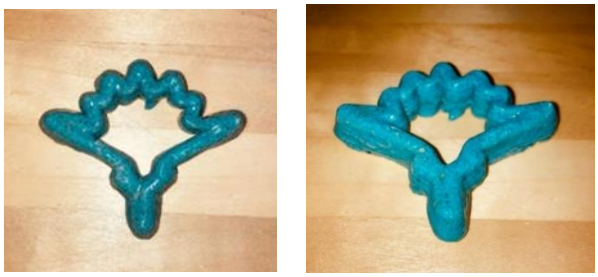


صورة رقم (٨) توضح تصميم لزهرة اللوتس أثناء للطباعة

صورة رقم (٩) توضح زهرة اللوتس بعد الطباعة

جدول رقم ٣: يوضح محددات التشغيل لزهرة اللوتس ٢،١

زهرة اللوتس ١	الأبعاد (سم)	نسبة الماء %	ضغط الهواء (بار)	زمن الطباعة (دقيقة)
تركيبة رقم ١	١٨* ١٤ *٥	٢٠	٣-٤	٢١دقيقة و٣٧ثانية
زهرة اللوتس ٢	**الأبعاد**	**نسبة الماء %**	**ضغط الهواء (بار)**	**زمن الطباعة (دقيقة)**
تركيبة رقم ٣،٢،١	٧*٨*٢	٢٠	٣-٤	٥



صورة رقم (١٠) توضح زهرة اللوتس من التركيبة رقم ٢ بعد الحريق عند درجة حرارة ٩٥٠°م وبمعدل حريق بطيء حوالي ١٣٠ °م كل ساعة

صورة رقم (١١) توضح زهرة اللوتس من التركيبة رقم ١، ٣ حيث استخدم نوعين من الأكاسيد لعمل تداخل لوني تداخل أثناء الطباعة

صورة رقم (١٢) توضح طباعة زهرة اللوتس بكل من التراكيب رقم ١، ٢، ٣

نتائج البحث:

من خلال الجانب التطبيقي للبحث تم التوصل إلي تركيبة جسم ذاتية التزجج من العجينة المصرية القديمة تصلح لتقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد من خلال تقنية البثق، ومن أهم النتائج:

1- تختلف نسبة الماء باختلاف تركيبة الجسم وكانت أفضل نسبة لإضافة الماء هي ٢٠% للتركيبة المقترحة.

2- يجب استخدام مواد تشحيم لجميع أجزاء باثق الطابعة لتسهيل خروج العجينة المصرية القديمة خاصة الفوهة، نظرا لاحتوائها على خامات غير لدنة بنسبة ٨٨%.

3- استخدام ضغط هواء حوالي ٣ إلى ٥ بار بشرط استخدام مواد التشحيم، حين أن الطينات اللدنة تحتاج من حوالي ٢ إلى ٤ بار.

4- توجد الصعوبة في طباعة الارتفاعات العالية من العجينة المصرية لأنها مادة غير نيوتونية، مما يعني أنها ذات لدونة غير ثابتة بمرور الوقت ومعامل قص ثابت، لذلك يفضل استخدام الطابعات الثلاثية الأبعاد المتحكم في خروج الأجسام منها باستخدام ضغط الهواء حتى يمكن زيادة أو تقليل كمية العجينة بشكل سريع من خلال ملاحظة اختلاف لدونة الجسم أثناء الطباعة.

5- يجب تخفض سرعة حركة الطابعة نظرا لبطيء خروج العجينة المصرية القديمة من فوهة الماكينة.

6- يمكن تشكيل تصميمات مفرغة بسمك حوالي ٠,٥ سم وأكبر حجما بالعجينة المصرية القديمة من خلال الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد وهو ما يصعب تشكيله يدويا.

7- بعد حريق عينات العجينة المصرية القديمة يختفي جزئيا أثر الطباعة وشكل الطبقات واحدة تلو الأخرى نظرا لتزجج الجسم.

8- يظهر انحراف في الخطوط المستقيمة عند الارتفاع، ولذلك يفضل طباعة تصميمات ذات خطوط منحنية بدلا من المستقيمة.

9- نسب انكماش عينة العجينة المصرية القديمة بعد الجفاف ١٥%، ونسبة انكماش الحريق وصلت إلي ٢٥% نظرا لتزجج الجسم والانصهار الجزئي للخامات أثناء الحريق فلابد من مراعاة الأبعاد الرسوم ثلاثية الأبعاد قبل الطباعة.

التوصيات:

1- زيادة الاهتمام الأكاديمي بالأبحاث العلمية لتقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد للعجينة المصرية القديمة لطباعة أحجام كبيرة وتصميمات ذات تفاصيل دقيقة.

2- إجراء دراسات تاريخية في مجال الخزف تهدف لحصر الآثار المصرية القديمة التي تناسب الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد.

المراجع:

- Elyssa Iris Okkelberg, 2011, "Exploring ancient Egyptian faience with nanotechnology: compositional mapping, microstructure analysis, and modern applications", Baccalaureate Degrees, Departments of materials science and engineering and art history, the Pennsylvania state university Schreyer Honors College.
- Fuwen Hu, Tadeusz Mikolajczyk, Danil Yurievich Pimenov and Munish Kumar Gupta, 2021, "Article Extrusion-Based 3D Printing of Ceramic Pastes: Mathematical Modeling and In Situ Shaping Retention Approach".
- Griffin, P. S., 2002, "Reconstructing the Materials and Technology of Egyptian Faience and Frit, in Materials Issues in Art and Archaeology" VI (P. B. Vandiver, M. Goodway, and J. L. Mass, eds.), Materials Research Society, Warrendale, PA.
- Nicholson, P. T.,1993, "Egyptian Faience and Glass", Shire Publications, Princes Risborough, Buckinghamshire, UK.
- Wulff, H. E., H. S. Wulff, and L. Koch, 1968, :Egyptian Faience – A Possible Survival in Iran", Archaeology.
- Zahed Tajeddin, 2015, PhD thesis, AHRC-funded research project, UWE Bristol" University of the West of England Bristol".

- Zhangwei Chen , Ziyong Li, Junjie Li, Chengbo Liu, Changshi Lao , Yuelong Fu, Changyong Liu, Yang Li, Pei Wang, Yi He, 06 November 2018, "3D printing of ceramics: A review", Journal of the European Ceramic Society , Additive Manufacturing Institute, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, China, p221.
- Chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fceramicartsnetwork.org%2Fdocs%2Fdefault-source%2Fuploadedfiles%2Fwp-content%2Fuploads%2F2015%2F03%2Fegyptianpaste.pdf&clen=141801
- https://www.metmuseum.org/art/collection/search/544227
- https://www.metmuseum.org/blogs/collection-insights/2018/faience-toah-introduction
- http://www.joanlansberry.com/setfind/laterwas.html
- https://digitalfire.com/material/feldspar
- https://digitalfire.com/material/3077
- https://digitalfire.com/material/106