أثر التبريد أثناء الطباعة ثلاثية الأبعاد بخيوط متعدد حمض اللاكتيك على جودة النماذج المطبوعة

Effects of cooling during 3D Printing for PLA filaments on printed models quality

أ.د.نيفين عبد العزيز صالح
أستاذ بقسم الطباعة والنشر والتغليف، كلية الفنـون التطبيقية - جامعة حلوان، القاهرة، مصر، Nevine_saleh@a-arts.helwan.edu.eg

أ.د.وسام أنسى إبراهيم
أستاذ بقسم المنتجات المعدنية والحلى، كلية الفنــون التطبيقية - جـامعة حلوان، القاهرة، مصر، Wesam.Onsy@buc.edu.eg

مروة محمود عبد اللطيف مبارك
معيدة بقسم التعلم الإلكترونى بمعهد تكنولوجيا المعلومات، وزراة الإتصالات وتكنولوجيا المعلومات، القاهرة، مصر، marwa.mubarak@hotmail.com

ملخص البحث Abstract:
التشكيل بالخيوط المنصهرة Fused Filament Fabrication "FFF" والمعروفة أيضا بالنمذجة بالترسيب المنصهرFuse deposition modelling "FDM" من أكثر تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد إنتشارا والأكثر استخداما بالطابعات المكتبية ثلاثية الأبعاد والتى زادت انتشارا فى السنوات القليلة الماضية بين العديد من الفئات سواءا متخصصين أو هواة، والمواد الخام المستخدمة بها من اللدائن الحرارية Thermoplastics على شكل خيوط أشهرها خيوط متعدد حمض اللاكتيك PLA وذلك لسهولة استخدامة وكونه يعد صديقا للبيئة لقابليته للتحلل وتعتمد تلك التقنية فى طريقة بناءها للنماذج على مبدأ الترسيب الانتقائى لتلك الخيوط بعد تليينها حراريا لتصبح قابلة للتشكيل والبثق من فوهة الطابعة Nozzel ومن ثم تندمج طبقاتها الساخنة معا وتتصلب بعد تبريدها. وتكمن مشكلة البحث فى ظهور العديد من المشكلات بالنماذج المطبوعة بخيوط الـ PLA تعود أسبابها الى تبريد النموذج المطبوع أثناء طباعته وبعد بثقه من فوهة الطابعة مباشرة هذه المشكلات مثل دقة الأبعاد وتشوه السطح الخارجي للنموذج، لذا اهتم البحث بتوضيح أثر التبريد على جودة المطبوعات بخيوط PLA وتوضيح طرق التحكم فى تبريد الجزء المطبوع من خلال إجراء عدة تجارب طباعية بظروف تبريد مختلفة وتسجيل ومقارنة النتائج وبيان ما تم تطبيقه خلال التجارب لحل المشكلات ورفع جودة المطبوعات، حيث أشارت النتائج الرئيسية أثر التبريد الواضح على دقة الأبعاد وجودة السطح خاصة تصميمات الأجزاء البارزة والنهايات الدقيقة بمطبوعات الـ PLA وكذلك أهمية تصميم قناة توزيع الهواء حول الجزء المطبوع Fan/blower duct.

كلمات دالة Keywords:
جودة الطباعة ثلاثية الأبعاد
3DPrinting Quality
تبريد الجزء
Part Cooling
التشكيل بالخيوط المنصهرة
Fused Filament Fabrication
خيوط متعدد حمض اللاكتيك
PLA "Polylactic Acid" filament

Paper received 9th February 2021, Accepted 4th May 2021, Published 1st of July 2021

مقدمة Introduction:

تعددت تطبيقات الطباعة ثلاثية الأبعاد فى الوقت الحاضر وبشكل متزايد فى مختلف المجالات فى الصناعة والتعليم والطب والفن والفضاء ولإنتشار الطابعات المكتبية مفتوحة المصدر بتقنية التشكيل بالخيوط المنصهرة FFF أثر كبير فى وصول التجرب الطباعية لأيدى العديد من المستخدمين هواة او متخصصين وادت هذه الإتاحة الى زيادة انتشار تلك التقنية وانخفاض ملحوظ فى اسعار طابعاتها وخاماتها ومع هذا الانتشار المتزايد والمستمر كانت الحاجة ملحة للبحث المستمر فى جودة الطباعة ومخرجاتها وتقديم حلول فعاله لما قد يتعرض له مستخدميها فى مختلف المجالات خاصة من غير التقنيين او المتخصصين بالمجال، وخيوط متعدد حمض اللاكتيك PLA هى أشهر خيوط اللدائن الحرارية المستخدمة فى تلك الطابعات وتتأثر جودة النماذج المطبوعة بخيوط اللدائن الحرارية بعدة عوامل خلال رحلة الطباعة مؤثرة على الجودة الجمالية ودقة أبعادها وأحد أهم تلك العوامل هو التبريد أثناء الترسيب الطباعى وبعد بثقها من فوهه الطابعه حيث خروجها من تحكم الطابعة الى العوامل البيئية المحيطة والمؤثرة على سرعة وكيفية فقدانها لحرارتها وبالتالى جودة الترسيب الإنتقائى وجودة التشكيل. وبالتحكم الجيد فى تلك العملية وسرعتها ومعرفة أثارها والمشكلات الناجمه عنها تتحسن جودة المطبوعات النهائية.

مشكلة البحث Statement of the problem:

تأثر جودة المطبوعات ثلاثية الأبعاد بخيوط متعدد حمض اللاكتيك بعملية تبريد النموذج أثناء الطباعة بطابعات التشكيل بالخيوط المنصهرة.

أهمية البحث Importance:

تكمن أهمية البحث فى بيان تأثير التبريد أثناء الطباعة بخيوط متعدد حمض اللاكتيك على جودة المطبوعات وبيان طرق التحكم المختلفة فى التبريد لحل مشكلات المطبوعات.

أهداف البحث Objectives:

يهدف البحث إلى التعرف على أثر التبريد على جودة المطبوعات ثلاثية الأبعاد المطبوعة بخيوط متعدد حمض اللاكتيك PLA وبيان المشكلات المتعلقة بالتبريد، وكيفية تحسين جودتها وحل تلك المشكلات من خلال ضبط تبريد الجزء أثناء الطباعة.

منهج البحث Research Methodology:

يعتمد البحث على المنهج الوصفى والمنهج التجريبي فى تطبيق الحلول وملاحظة النتائج.

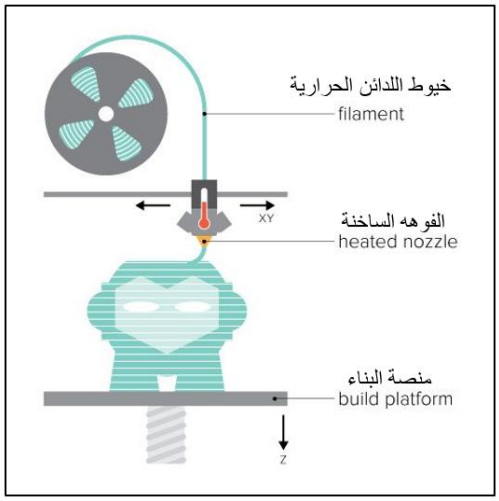
الاطار النظري Theoretical Framework :

1- مفهوم الطباعة ثلاثية الابعاد:

الطباعة ثلاثية الأبعاد ويطلق عليها أحيانا التصنيع بالإضافة (شلتوت، ٢٠١٩)هو مصطلح يشير إلى عملية الحصول على نموذج مادى من تصميم رقمى ثلاثي الأبعاد من خلال إضافة طبقات رقيقة متتالية من مادة ما طبقة تلو الأخرى حتى يصل إلى الشكل النهائى المكتمل(Prusa, 2019).وتعد أى من هذه الطبقات جزء من مقطع عرضى من النموذج النهائى(صيام، ٢٠١٥). ويتراوح حجم النماذج التى يمكن انتاجها بالطباعة ثلاثية الابعاد بين حجم النانو متناهى الصغر الى العديد من الامتار مثل احجام المبانى والمنازل(شلتوت، ٢٠١٩).

2- طابعات التشكيل بالخيوط المنصهرة FFF:

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

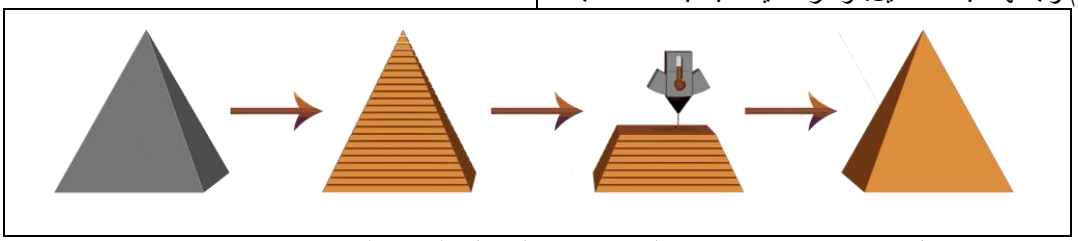


شكل رقم (١): شكل مبسط لعملية الطباعة بالخيوط المنصهرة(3dlink, 2016)

هناك العديد من تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والتى تختلف فيما بينها فى طريقة إضافة الطبقات والية اندماجها معا لتكوين النموذج ثلاثى الابعاد النهائي والطابعات التى تعمل بتقنية التشكيل بالخيوط المنصهرة Fused Filament Fabrication FFF والتي هى إحدى تقنيات الطباعة ببثق المواد Material Extrusion (PrintLab.,2018). تعتمد فى طريقتها لبناء النماذج ثلاثية الأبعاد على عملية بثق المادة الخام بشكل انتقائى كما هو موضح فى رسم مبسط فى شكل رقم(١) وعادة ما تكون المادة الخام على شكل خيوط بوليمرية مطاوعة للحرارة "اللدائن الحرارية" Thermoplasticsوذلك من خلال نظام بثق Extruder ينتهى بفوهة الطابعة والذى يعمل على صهر خيوط المادة الخام وجعلها قابلة للتشكيل. وتعرف أيضا بطابعات النمذجة بالترسيب المنصهر "FDM Fuse deposition modelling وهذا هو المصطلح الذى سجلت به هذه التقنية لصالح شركة Stratasys بينما ظهر مصطلح التشكيل بالخيوط المنصهرة FFF من قبل مشروع " Replicating RepRap "Rapid prototype تجنبا للوقوع فى قضايا العلامة التجارية مع الشركة المالكة. وهو مشروع اهتم بتطوير تلك التقنية وجعلها مفتوحة المصدر وكان بداية انتشار حقيقي للطابعات المكتبية ثلاثية الأبعاد.

مراحل طباعة النموذج ثلاثي الأبعاد:

عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد تتم من خلال خطوات أساسية كما هو موضح فى رسم بسيط بالشكل رقم (٢) وهذه الخطوات هى:



شكل رقم (٢): يوضح خطوات الطباعة بتقنية التشكيل بالخيوط المنصهرة (my3dconcepts,2017)

٣-١ الخطوة الأولى:

وهى التصميم بمساعدة الحاسب Computer Aided Deisgn، للحصول على الملف الرقمى للنموذج المراد انتاجه والذى يحوى معلومات محددة حول البناء الهيكلى للنموذج وحفظ هذه المعلومات بصيغة ملف قياسية وهى STL، وهي اختصار لغة الفسيفساء القياسيةStandard Tessellation Language والتى بإمكان أغلب الطابعات التعامل معها.

٣-٢ الخطوة الثانية:

الإعداد الطباعى وهى إعداد ملفSTL ، وتسمى أيضا مرحلة التقطيع والتى يتم فيها تحديد خصائص العملية الطباعية من حيث دقة الطباعة وسرعتها ودرجة الحرارة وطبيعة المادة الخام وغيرها من الخصائص التى تساعد على التحكم فى جودة العملية الطباعية وحفظها بصيغة تفهمها الاله وهى ملف الـG-code والذى يحوى معلومات دقيقة تترجم من قبل الاله الى حركات لاتمام بناء النموذج (Pollette, 2019).

٣-٣ الخطوة الثالثة:

وهى الطباعة وتبدا بإعداد الطابعة، وتجهيزها للقيام بعملية طباعية جديدة. مثل إعادة تعبئة المادة الخام وتنظيف منصة الطباعة ثم تحميل ملف ال G-code وبدء عملية الطباعة. قد تستغرق هذه العملية ساعاتٍ أو حتى أيامٍ لتكتمل، وذلك اعتمادًا على حجم الغرض والآلة والمواد المستخدمة.

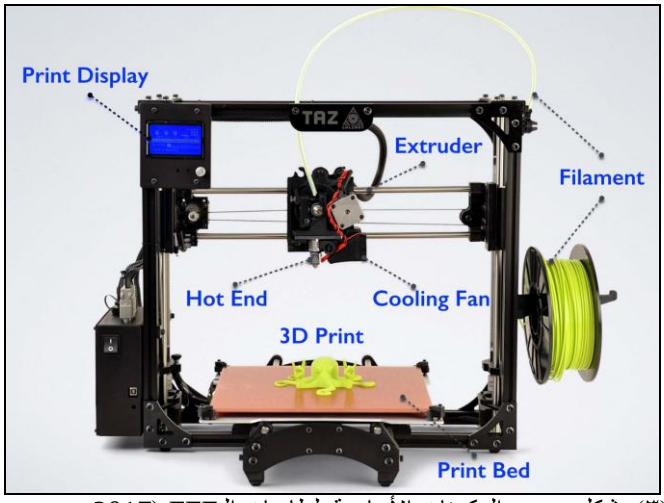
٣-٤ الخطوة الرابعة:

الإزالة، إزالة الغرض أو الأغراض المطبوعة من الآلة واستخدامها أو معالجتها بالطرق المناسبة كالتجميع أو إزالة الدعامات أو التلوين إذا تتطلب الأمر (PrintLab.,2018).

3- أهمية التبريد أثناء الطباعة :

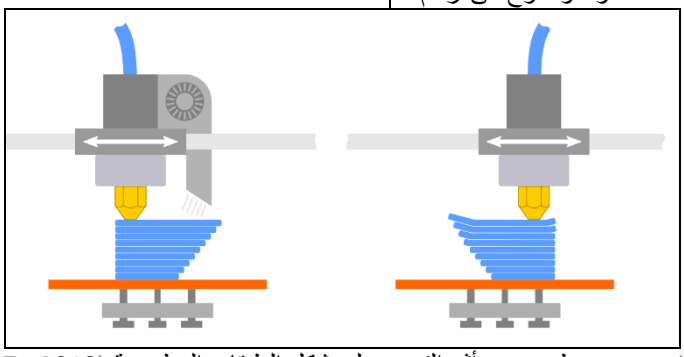
فى عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد لبثق خيوط اللدائن الحرارية يرفع الباثق Extruder درجة حرارة الخيط للحصول على اللزوجة المناسبة لتدفقه عبر الفوهة الساخنة Hot End/Nozzel، يتم بعد ذلك تحريك الفوهة من مكان لاخر داخل المساحة الطباعية بواسطة نظام حركة الطابعة ثلاثية الأبعاد لبثق كائن بأكمله تدريجيًا طبقة تلو الأخرى(Noorani, 2018).

ويوضح الشكل رقم (٣) المكونات الأساسية لطابعات الخيوط الحرارية والتى يظهر بها مروحة التبريد بجانب الفوهة والتى تسمى أحيانا بالنهاية الساخنه والتى تمر منها المادة الخام للترسب على سرير الطباعة Print Bed وفقا لتصميم المطبوع ثلاثي الأبعاد 3D Print.



شكل رقم (٣): شكل يوضح المكونات الأساسية لطابعات الـFFF (my3dconcepts,2017)

وعندما يتحرك خيط المادة الخام داخل الطابعة عبر الباثق والفوهة فإنه يكون تحت سيطرة الطابعة من خلال أوامر ملف الـ G-CODE المحمل بأوامر تفهمها الالة وتترجمها لحركات فيتم التحكم فى سلوكه من خلال التحكم بدرجة حرارته وسرعة تدفقه، ولكن بمجرد أن يترك الفوهة، وتبدأ عملية الترسيب يصبح خارج عن السيطرة متروكا لخصائصه متأثرا بالعوامل البيئية بسهوله وذلك بسبب حالته اللينة المساعدة على سهولة تحكم قوى الجاذبية به فتسحب خيوطه لأسفل مسببة تدلى أوتشوه لطبقاته كما هو موضوع فى رسم مبسط بالشكل رقم (٤) . لذلك من الأهمية بمكان التأكد من عدم تحرك البلاستيك أو تشوهه بعد ترك الفوهة (Stevenson, 2016). ويتم ذلك عن طريق اعادته لحالته الصلبة في أسرع وقت ممكن وهنا يظهر أهمية التبريد. لذلك نجد مراوح تبريد الجزء المتواجدة بجانب الفوهه الساخنة بالطابعات ثلاثية الأبعاد والمختصة بتبريد الطبقات المطبوعة أثناء الطباعة تطلق هذه المراوح الهواء على البلاستيك المبثوق حديثًا في محاولة لتبريده بسرعة كبيرة.



شكل رقم (٤): رسم مبسط يوضح أثر التبريد على شكل الطبقات المطبوعة (Stemfie3D, 2019)

في بعض الحالات ، يكون التبريد أقل أهمية لأن البلاستيك المبثوق يستريح ببساطة على طبقة سابقة. لكن هذا ليس هو الحال دائمًا. في بعض الأحيان يكون للبثق الجديد بروز طفيف. إذا لم يتم تبريده بشكل صحيح، فقد يتدلى محدثا تشوها للجزء. وقد يكون الأمر أكثر صعوبة إذا كان هناك "جسر" حيث لا يوجد شيء على الإطلاق تحت خيوط المادة الخام المبثوقة حديثا بحاله لينة بإمتداد لمسافة معينه بين نقطتي ارتكاز الجسر إذا لم يتم تبريده بشكل صحيح، فسوف تتدلى الطبقات الأولى منه وينخفض الجسر أو حتى ينهار . (Pelonis, 2013)

هذا هو السبب في أهمية التبريد والمراوح حول الفوهة. ويجب ألا تتسبب المراوح فى تبريد الطرف الساخن Hot end، لكن يجب أن تعمل على تبريد البثق الجديد من الخيوط بطريقة صحيحة للحصول على الجودة الطباعية المطلوبة.

الدراسة التجريبية Experimental Study:

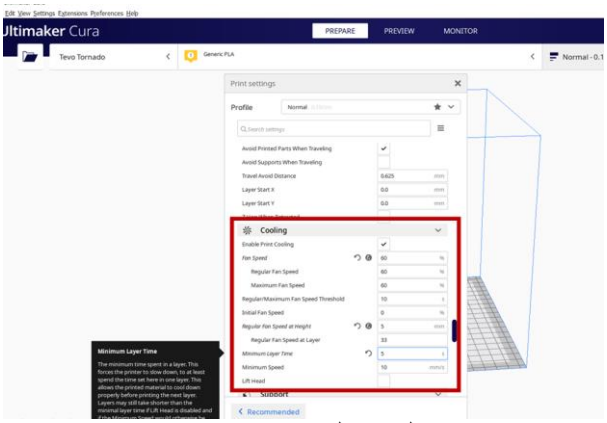
تم إجراء التجارب العملية بإستخدام خيوط متعدد حمض اللاكتيك PLA وبإحدى طابعات التشكيل بالخيوط المنصهرة مفتوحة المصدر ذات نظام التبريد الأحادى حيث تحتوى على مروحة واحدة لتبريد الجزء المطبوع Single cooling Fan وتم استخدام برنامج Ultimaker Cura 4.7 للتقطيع وإعداد ملف الـ G-Code الطباعي.

وقبل عرض التجارب العملية التى توضح المشكلات التى ظهرت بالمطبوعات متأثرة بالتبريد من الضرورى توضيح كيفية التحكم فى التبريد أثناء الطباعة.

1- طرق التحكم فى تبريد الجزء المطبوع أثناء الطباعة

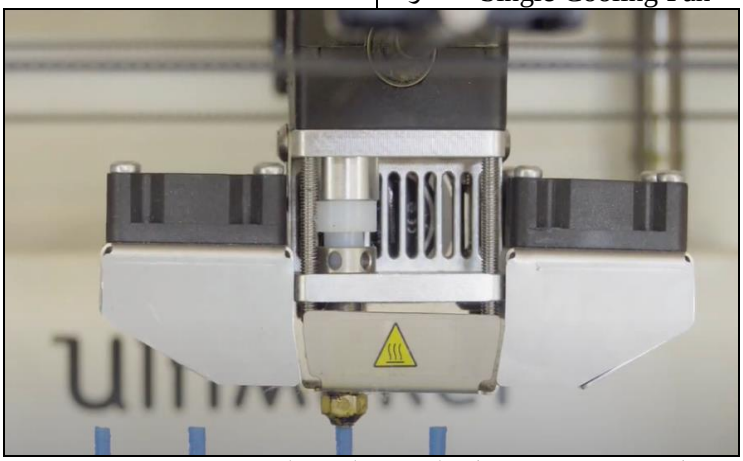
أثناء التجربة الطباعية هناك طريقتين للتحكم فى تبريد الجزء/النموذج المطبوع **الطريقة الأولى** من خلال برنامج الإعداد الطباعى "برنامج التقطيع" أثناء عملية إعداد الملف الرقمي STL حيث يمكن من خلال برنامج Ultimaker Cura4.7 المستخدم فى اعدادا ملفات التجارب الطباعية التحكم فى سرعة مروحة التبريد من خلال إعدادات التبريد Cooling Setting الموضحة بالشكل رقم (٥) والتى من خلالها يمكن التحكم فى سرعة مروحة Fan Speed التبريد وبالتالى قوة الهواء المستخدم فى تبريد النموذج أثناء الطباعة كما يمكن التحكم فى وقت تبريد الطبقة الواحدة من خلال تحديد أقل وقت يمكن للطبقة بعده استقبال طبقة جديدة Minimum Layer Time.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



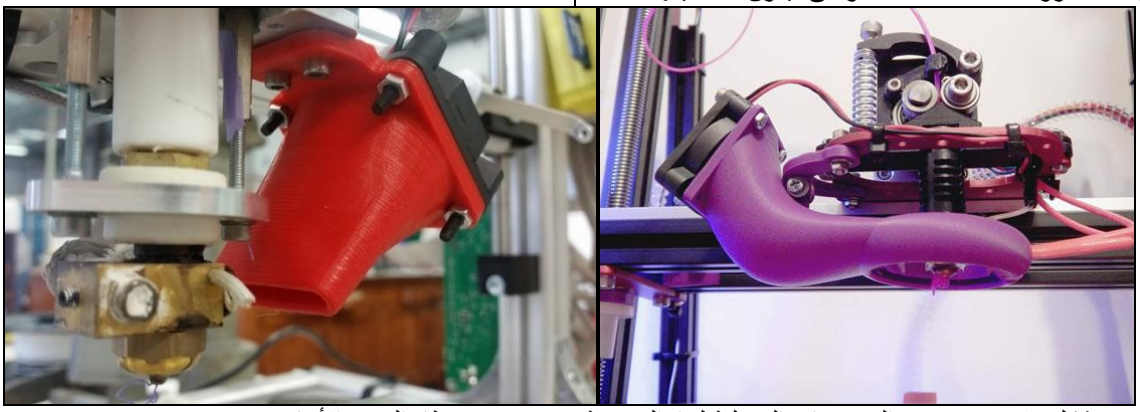
شكل رقم(٥): يوضح اعدادات التحكم بالتبريد فى برنامج Ultimaker Cura 4.7

أما الطريقة الثانية للتحكم فى التبريد هى نظام تبريد الجزء بماكينة الطباعة والمكون من مروحة تبريد الجزء Part Cooling Fan وقناة توزيع الهواء الملحقة به Fan Duct ونجد أن هناك طابعات تحتوى على مروحتين بدلا من واحدة لتبريد الجزء المطبوع ويعرف نظام التبريد بها بنظام التبريد ثنائي المروحة Dual Cooling Fan كما هو موضح بشكل رقم (٦) أو تكون مروحة واحدة فقط كما فى الطابعة المستخدمة فى تجارب البحث ويسمى نظام التبريد بأحادي المروحة Single Cooling Fan كما هو موضح بالشكل رقم (٧) أمثلة على نظام وكل نظام منهم له إستخداماته وإحتياجاته وفقا للمادة الخام المستخدمة فى الطباعة فعلى سبيل المثال تحتاج الطباعة بمواد مرنه لقوة تبريد عالية والتى تتوفر من خلال نظام التبريد الثنائى بينما لا تحتاج الطباعة بخيوط مثل متعدد حمض اللاكتيك " PLA "Polylactic Acid وهى من اشهر المواد الخام بطابعات الخيوط البلاستيكية الى قوة تبريد عالية ويوفر النظام أحادى المروحة التبريد اللازم لها.



شكل رقم (٦): يوضح مثال على نظام التبريد الثنائى Dual cooling fan

ويمكن التحكم فى نظام التبريد الميكانيكى بالماكينة بتشغيله أو ايقافه أو كمية هواء التبريد من خلال برنامج الإعداد الطباعى كما سبق التوضيح بالتحكم فى سرعة المروحة.أما كيفية توزيع الهواء فيكون من خلال تصميم مجرى الهواء بقناة المروحة Fan duct والتى يكون تصميمها أحد العوامل المؤثرة على جودة النموذج حيث يتحكم هذا التصميم فى كيفية توزيع الهواء على الطبقات المطبوعة (Quintans,2016). وتصميم قناة المروحة شديد العلاقة والتأثير فى أنظمة التبريد الأحادية.



شكل رقم(٧): يوضح التصميمات المختلفة لقناة المروحة Fan Duct بنظام التبريد الأحادى Single cooling fan

1- التجربة الأولى :

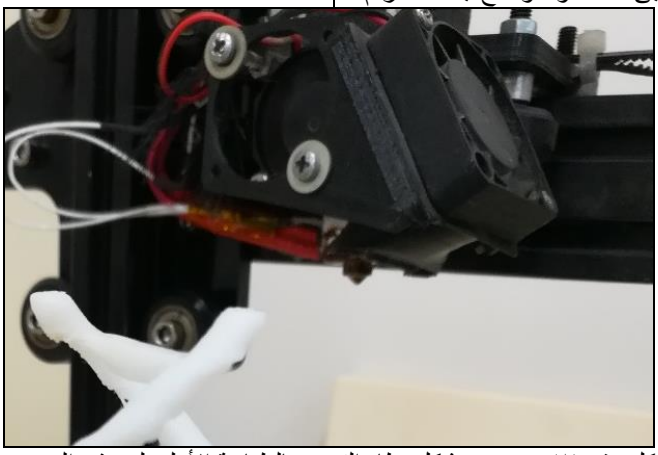
تمثل التجربة طباعة نموذجا للحمض النووى DNA، تصميم النموذج به جسورا وأجزاءا بارزه.

تم طباعة النموذج مرتين DNA 02-DNA 01 بظروف ثابتة مع اختلاف ظروف التبريد، ويوضح الجدول رقم(١) ظروف التجربة الثابتة.

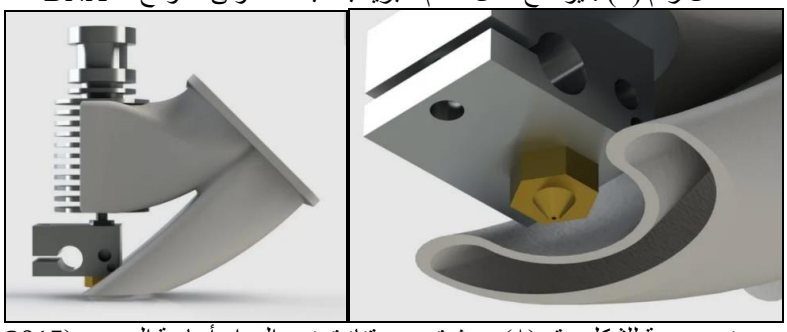
جدول رقم (١): يوضح الظروف الثابتة لنموذجي الـDNA بالتجربة الأولى

Material	White PLA+	المادة الخام
Layer Hight	0.2mm	ارتفاع الطبقة
Infill	20%	الحشو
Print Speed	40mm/s	سرعة الطباعة
Extrusion Temperature	205 °C	درجة حرارة الطباعة
Print Cooling	Enable	التبريد الطباعى
Fan speed	60 mm/s	سرعة المروحة

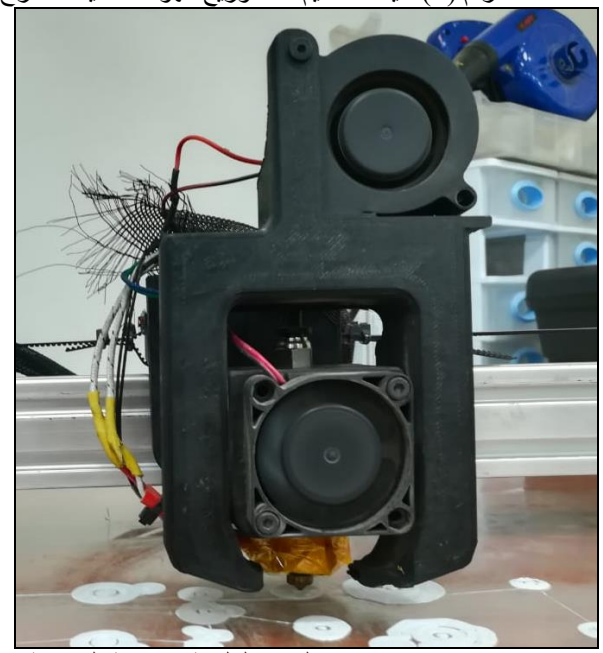
أما عن الإختلاف فى ظروف التبريد بين النموذجين فتتمثل فى تصميم قناة توزيع الهواء الملحقة بمروحة التبريد ففى المرة الأولى لطباعة نموذج الـDNA كان تصميم قناة المروحة Fan Duct جانبى كما هو موضح بالشكل رقم (٨) ومفصلا تصميمه بالشكل رقم (٩). أما تصميم قناة التبريد عند طباعة النموذج الثاني كانت ثنائية التوزيع تحيط بفوهة الطابعة كما تظهر بالشكل رقم (١٠) .



شكل رقم (٨) : يوضح شكل نظام التبريد بالطباعة الأولى لنموذج الـ DNA



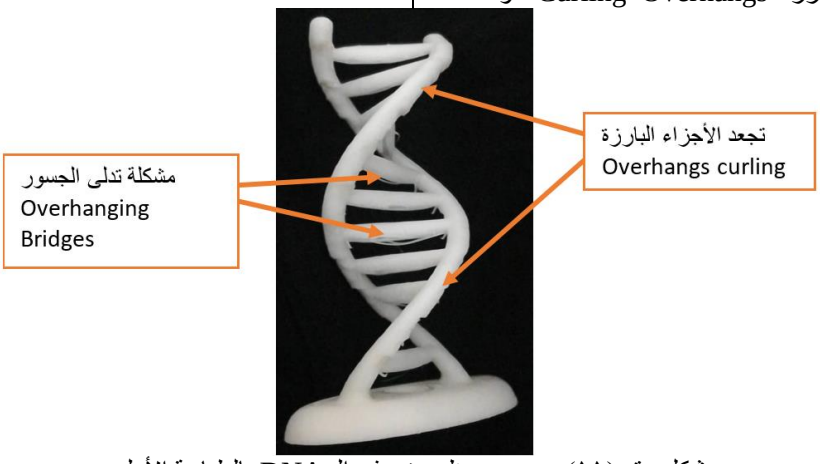
شكل رقم (٩) : صورة موضحة للشكل رقم (٨) حيث تصميم قناة توزيع الهواء أحادية المخرج (Eipionezero, 2015)



شكل رقم(١٠): يوضح تصميم قناة توزيع الهواء الملحقة بمروحة التبريد ثنائية المخرج

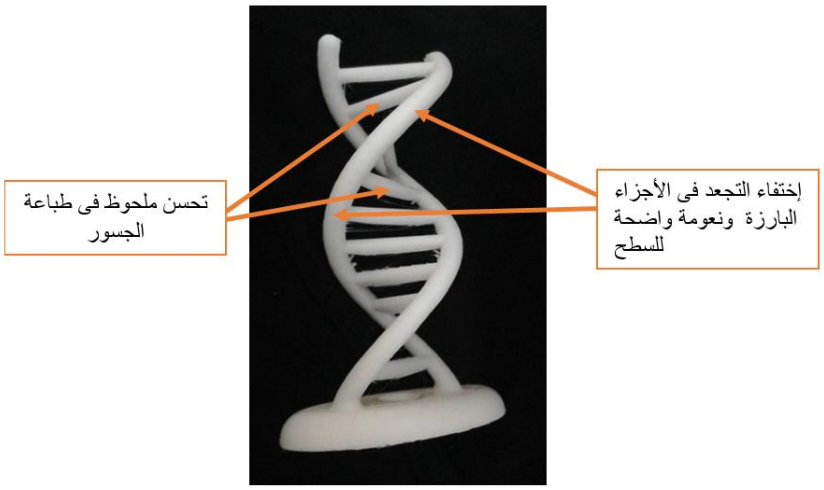
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ويوضح الشكل رقم (١١) مظهر النموذج بعد الطباعة الأولى حيث يظهر بالنموذج مشكلات بالسطح تتمثل فى تجعد لأجزاءة البارزة Curling Overhangs، ومشكلة تدلى الطبقات الأولى للجسور Overhanging Bridges بالنموذج.



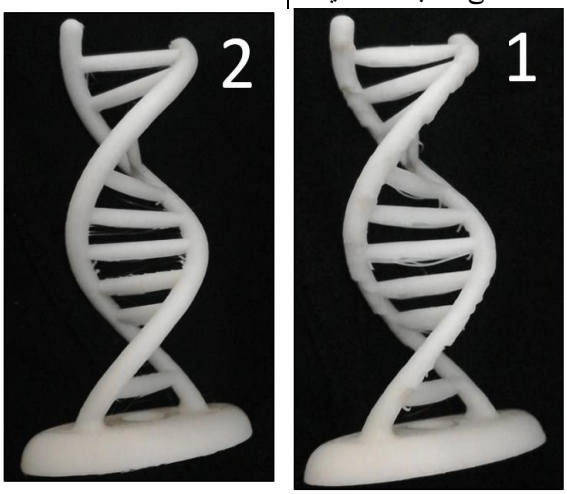
شكل رقم (١١) : يوضح مظهر نموذج الـ DNA بالطباعة الأولى

ويوضح الشكل رقم (١٢) مظهر النموذج بعد الطباعة االثانية حيث يظهر بالنموذج بعد الطباعة الثانية طباعة جيدة للأجزاء البارزة وإختفاء التجعد، وتحسن ملحوظ فى طباعة الجسور.



شكل رقم (١٢): يوضح مظهر نموذج الـDNA بالطباعة الثانية

نتائج التجربة الأولى جاءت من خلال الملاحظة والمقارنة البصرية بين النموذج بالطباعة الأولى والنموذج بالطباعة الثانية حيث وجد أن تصميم قناة مروحة التبريد ثنائية التوزيع والتى تحيط بفوهة الطابعة والمستخدمة فى الطباعة الثانية للنموذج أدت الى جودة طباعية أعلى حيث أدت الى حل مشكلة التجعد وإلى تحسن ملحوظ بطباعة الجسور ورفع جودة النموذج كما هو موضح بالشكل رقم (١٣).



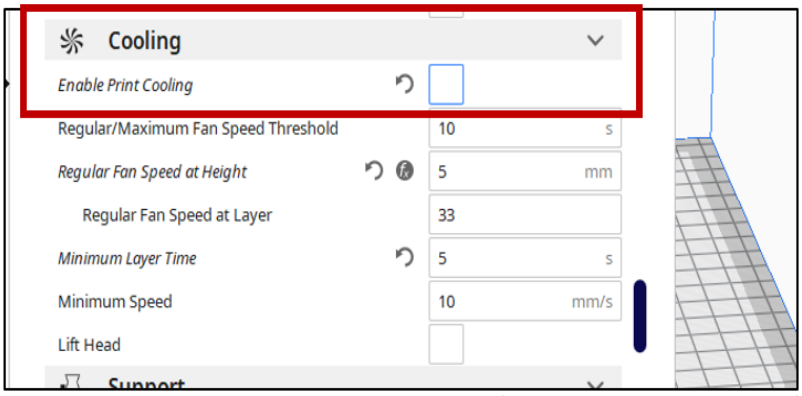
شكل رقم (١٣): يوضح المقارنة بين مظهر النموذج بالطباعة الأولى والثانية

2- التجربة الثانية:
تمثل التجربة طباعة نموذجا لهرم، قمة الهرم تمثل مثالاً على النهايات الدقيقة للنماذج حيث تم طباعة النموذج مرتين بظروف ثابتة مع اختلاف ظروف التبريد بين المرتين ويمثل الجدول رقم (٢) الظروف الثابتة للتجربة.

جدول رقم (٢): يوضح الظروف الثابتة للتجربة الثانية

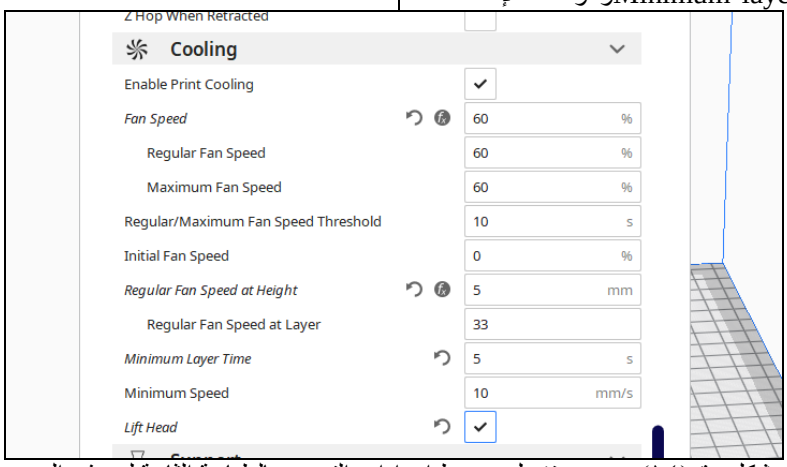
Material	Clear PLA+	المادة الخام
Layer Hight	0.2mm	ارتفاع الطبقة
Infill	100%	الحشو
Print Speed	30mm/s	سرعة الطباعة
Extrusion Temperature	210 °C	درجة حرارة الطباعة

أما عن الإختلاف فى ظروف التبريد بين النموذجين فتتمثل فى وجود التبريد وعدم وجوده حيث تم طباعة النموذج فى المرة الأولى بدون تبريد تماما من خلال عدم تفعيل الإعداد Disable Print Cooling ببرنامج الإعداد الطباعى Ultimaker Cura 4.7 كما هو موضح بالشكل رقم (١٣).



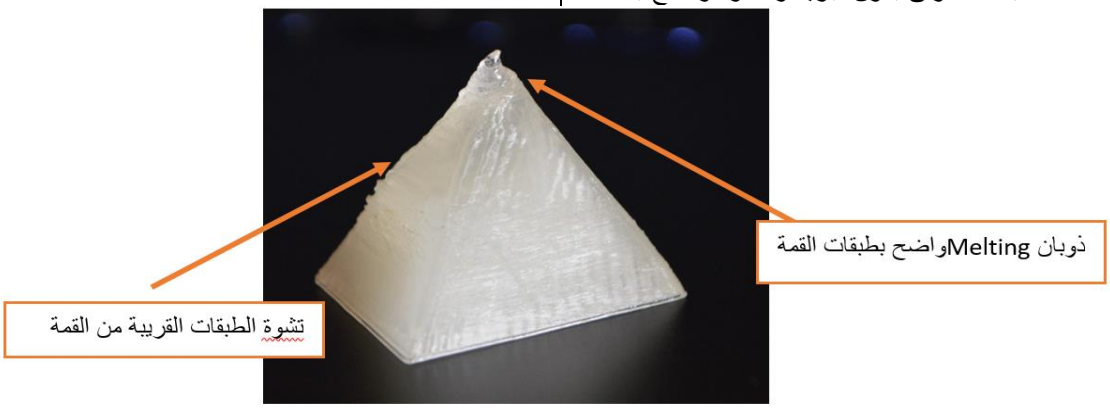
شكل رقم(١٣): يوضح إيقاف التبريد من برنامج Ultimaker Cura 4.7

ثم تم طباعة نموذج الهرم فى المرة الثانية بتشغيل إعدادات التبريد مع مراعات وقت تبريد الطبقة الواحدة ألا يقل عن ٥ ثوان من خلال إعداد Minimum layer Timeوهو أحد الإعدادات الهامة لضبط تبريد النهايات الدقيقة أثناء الطباعة ويوضح الشكل رقم (١٤) الاعدادات بالطباعة الثانية لنموذج الهرم.



شكل رقم(١٤): يوضح تفعيل وضبط إعدادات التبريد بالطباعة الثانية لنموذج الهرم

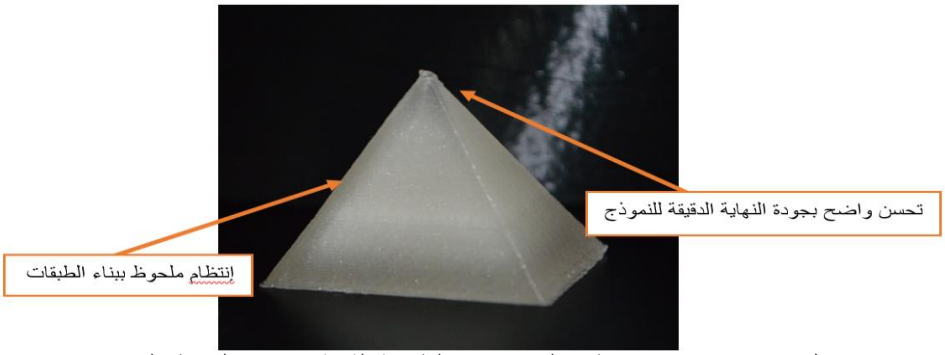
ويوضح الشكل رقم (١٥) مظهر نموذج الهرم بعد الطباعة الأولى بدون تبريد و تشوه واضح بالقمة ومظهر ذوبان واضح بها وبالطبقات القريبة من القمة.



شكل رقم (١٥): توضح مشكلة تشوة النهايات الدقيقة والطبقات بنموذج الهرم

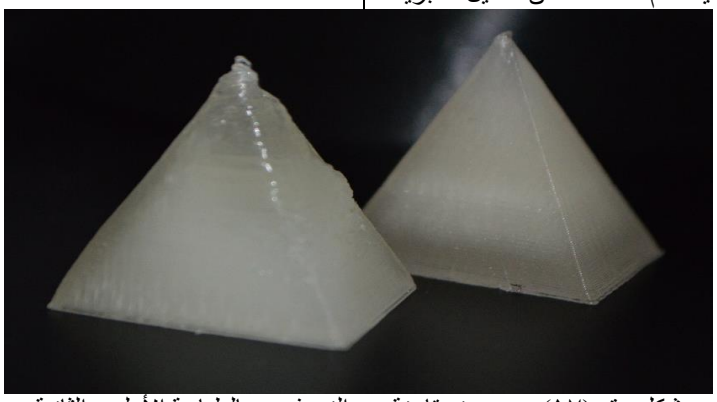
بينما يوضح الشكل رقم (١٦) مظهر نموذج الهرم بعد الطباعة الثانية فى وجود التبريد حيث طباعة جيدة لقمة الهرم وإختفاء مظهر الذوبان السابق.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



شكل رقم (١٦): يوضح مظهر النموذج بعد الطباعة الثانية وتحسن ملحوظ بالجودة

نتائج التجربة الثانية جاءت من خلال الملاحظة والمقارنة البصرية بين نموذج الهرم بالطباعة الأولى ونسخته الأخرى بالطباعة الثانية كما هو موضح بالشكل رقم (١٧)حيث تم ملاحظة أن تفعيل التبريد بالإعدادات الصحيحة في الطباعة الثانية أدى الى حل مشكلة تشوة النهاية الدقيقة لقمة الهرم ورفع جودة النموذج.



شكل رقم (١٧) : صورة مقارنة بين النموذجين بالطباعة الأولى والثانية

3- التجربة الثالثة:

تمثل التجربة الثالثة طباعة مكعب مفتوح طول ضلعه وفقا للتصميم المعد ٢٠ مم.

تم طباعة المكعب مرتين مكعب ١ و مكعب ٢ بظروف ثابتة موضحة بالجدول رقم (٣) مع إختلاف ظروف التبريد أحدهما فى وجود تبريد للنموذج أثناء الطباعة والأخرى بدون تبريد أثناء الطباعة ثم قياس الأبعاد .

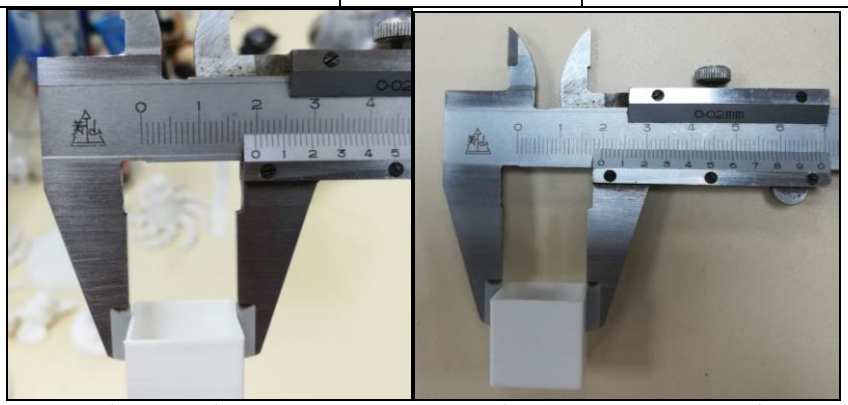
جدول رقم (٣): يوضح الظروف الثابتة للتجربة الثالثة

Material	White PLA	المادة الخام
Layer Hight	0.2mm	ارتفاع الطبقة
Shell	0.8mm	سمك الجدران
Infill	0%	الحشو
Print Speed	30mm/s	سرعة الطباعة
Extrusion Temperature	210°C	درجة حرارة الطباعة

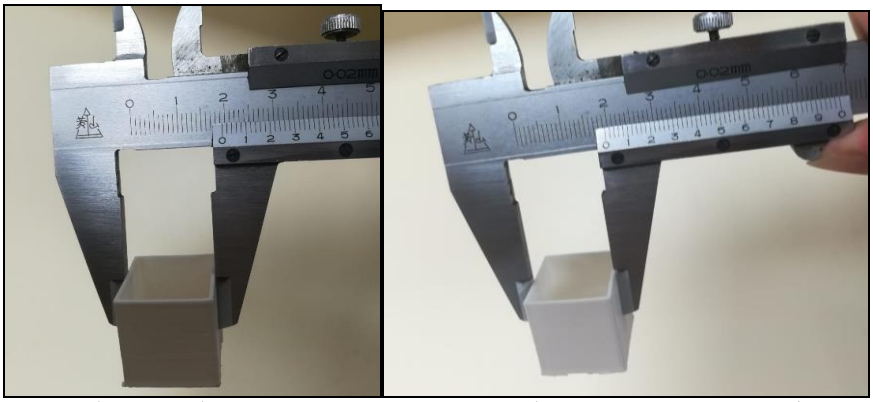
ثم تم قياس أبعاد النموذج بعد كل طباعة من الجهتين بإستخدام القدمة ذات الورنية وتسجيل النتائج بالجدول رقم (٤).

جدول (٤): يوضح قياسات أبعاد النموذج بالتجربة

Cube 01 dimensions without cooling	19.4 *19.4 mm	أبعاد المكعب ١ بعد الطباعة الأولى بدون تبريد
Cube 02 dimensions with cooling	19.8*19.8 mm	أبعاد المكعب ٢ بعد الطباعة الثانية بالتبريد

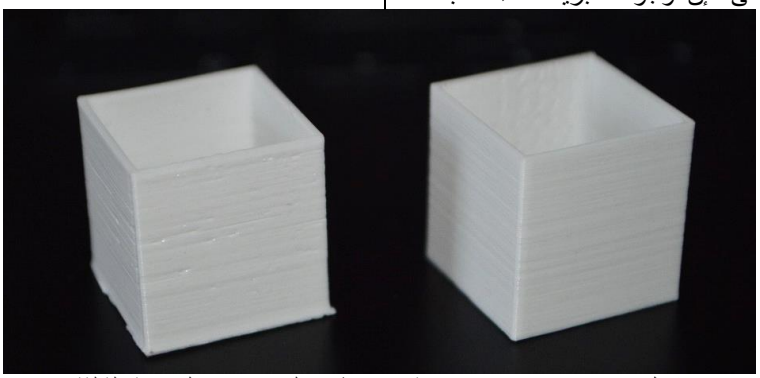


شكل رقم (٢٠): يوضح قياس المكعب ١ بدون تبريد بإستخدام القدمة ذات الورنية



شكل رقم (٢١): يوضح قياس المكعب ٢ مع وجود تبريد بإستخدام القدمة ذات الورنية

4- **نتائج التجربة الثالثة** جاءت من خلال مقارنة نتائج القياس لنموذجى المكعب بين الطباعة الأولى والثانية حيث أثبتت أنه فى حالة تفعيل التبريد كانت دقة الأبعاد أقرب ما يمكن لدقة الأبعاد المطلوبه وبالتالى فإن وجود التبريد أثناء الطباعة ضرورى لضمان دقة الأبعاد. أيضا من خلال الملاحظة بصريا كان مظهر الطبقات الطبوعة ذات جودة أعلى فى حالة تفعيل التبريد كما هو موضح فى الشكل رقم (٢٢).



شكل رقم (٢٢) يوضح مقارنة بين مظهر النموذجين بالتجربة الثالثة

النتـــــائج Results:

تتمثل نتائج البحث فى النقاط التالية:

- التبريد أحد العوامل الهامة المؤثرة على جودة النماذج بطابعات التشكيل بالخيوط المنصهرة .
- وجود تبريد أمر ضرورى فى حالة النماذج التى يحتوى تصميمها على جسور أو أجزاء بارزة أو نهايات دقيقة.
- وجود التبريد أمر ضرورى لضمان دقة الأبعاد للنماذج المطبوعة.
- تفعيل التبريد ليس كافيا لطباعة جيدة.
- الضبط الصحيح لإعدادات التبريد ببرنامج التقطيع أحد أهم عوامل نجاح طباعة النهايات الدقيقة.
- تصميم قناة مروحة تبريد الجزء Part Design Cooling Fan Duct يؤثر بشكل كبير على جودة النماذج الطباعية بخيوط الـ PLA.
- خيوط مادة الـ PLA لا تتطلب قوة تبريد عالية ويمكن الحصول على طباعة جيدة بنظام أحادى للتبريد Single Cooling Fan بتصميم جيد لقناة المروحة يضمن توزيع الهواء من جميع جوانب النموذج أثناء الطباعة .

المناقشة Discussion:

توضح التجارب العملية أن عدم تعرض النموذج المطبوع أثناء الطباعة للتبريد الصحيح يؤدى إلى العديد من المشكلات والتى ظهرت فى التجارب من خلال تشوهات بالجسور والأجزاء البارزة بالتجربة الأولى لنموذج الـDNA والأجزاء المتدلية في الطباعة ثلاثية الأبعاد Overhangs هي المكان الذي يبرز فيه الفتيل/ المادة الخام "يتدلى" من الطبقة السابقة بعيدًا جدًا إلى النقطة التي تكون فيها في منتصف الهواء ولا يتوفر دعم أسفلها. مما قد ينتج عن ذلك أن الطبقة المبثوقة Extruded layer "تتدلى" وتنتج جودة طباعية رديئة تبدو كتراكم الطبقات بشيء من الترحيل المؤدى للشكل المجعد وبدا ذلك واضحا فى أطراف النموذج الخارجية أما الجسور Bridges فهو مصطلح في الطباعة ثلاثية الأبعاد يشير إلى بثق أفقي للمادة الخام بين نقطتين بارزتين دون أي دعم من الأسفل وقد يحدث أحيانا تدلى للطبقات الأولى عند طباعتها قد تؤدى الى مشكلة أكبر وهى ضعف الجسور وسهولة إنكسارها خاصه تلك ذات السمك القليل وقد ظهر فى الطباعة الأولى للنموذج تدلى الطبقات الأولى للجسور الموجودة بمنتصف النموذج وظهرت هذه المشكلة بالتجربة الأولى نتيجة تعرض النموذج لتوزيع هواء التريد بشكل جانبي تسبب فيه تصميم قناة مروحة التبريد جانبية التصميم وقد يكون ناجحا هذا التصميم فى التصميمات المسطحة بينما لم ينجح هنا حيث لان أجزاء النموذج تتطلب توزيعا متساويا للهواء وأثبت ذلك أنه عندما تعرض بنفس الظروف لقناة توزيع ثنائية المخرج أدت الى توزيع متساوى للهواء على جانبى النموذج أثناء الطباعة وإختفت المشكلات التى ظهرت بالطباعة الأولى. أما المشكلة الثانية التى تأثرت بالتبريد وظهرت واضحة فى التجربة الثانية عند طباعة نموذج الهرم هى تشوه النهايات الدقيقة والطبقات القريبة من قمة الهرم ففى حين أن الطبقات الاولى للهرم طبعت بشكل جيد إلا أنه كلما ارتفعت الطبقات ظهرت المشكلة حيث تقلصت مساحة الطبقات تبعا للتصميم مما أدى إلى سرعة إستقبال الطبقات لبعضها دون تعرضها لتبريد كافى فكلما ارتفعت الفوهة فى بناء الشكل كلما كانت تتحرك راس الطابعه فى مساحة بناء أضيق فتزداد درجة الحرارة للطبقة ولا يحدث أن تأخذ وقتا كافيا للتصلب لتحتمل ضغط الطبقات الأعلى فتستقبل الطبقات الأعلى وهى لينة مما يؤدى الى تأثرها بالضغط بشدة ويحدث تأثير الذوبان Melting الواضح على الطبقات مسببا تشوه للنموذج. وقد يكون احد الحلول للتحكم فى تبريد الطبقات فى النهايات الدقيقة هو تكرار النموذج حتى تنتقل رأس الطابعة بين النموذجين موفرة فرصة كافية للطبقات فى تلك المناطق لكى تبرد قبل الطبقه التالية. إلا أن الحل

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

الأكثر فاعلية هو الضبط الصحيح لإعدادات التبريد ببرنامج التقطيع وتحديد أقل مدة زمنية متاحة لتبريد الطبقة قبل استقبال طبقة جديدة فمن الأخطاء الشائعة فى ضبط إعدادات التبريد إغفال ذلك وتساوى التبريد على طول النموذج وكان تشغيل التبريد بالشكل الصحيح سببا فى حل المشكلة فى الطباعة الثانية لنموذج الهرم إلا أن هناك ملاحظه بخصوص شفافية النموذج حيث تمت طباعته بخيوط PLA شفافة وتم ملاحظة اختلاف فى الشفافية على طول النموذج زاد بوضوح فى النهاية الدقيقة للنموذج الأول عند غياب التبريد وإرتفاع درجة حرارة الطبقات وتتطلب تلك الظاهرة مزيدا من البحث لم يكن محلها البحث إلا أن التفسير يؤيد أن جودة الشفافية تتطلب ارتفاعا لدرجة حرارة الطباعة، أيضا مشكلة دقة الأبعاد التى ظهرت فى التجربة الثالثة لطباعة المكعب أحد المشكلات توضح تأثر دقة الأبعاد عند الطباعة فى غياب التبريد إلا أن الاختلاف جاء مختلفا عن ما هو متوقع بالزيادة فى الأبعاد وليس بالنقصان حيث أن انضغاط الطبقات التى لم تتعرض لتبريد كاف من المفترض أن يسبب قدرا من الذوبان وبالتالى زيادة فى الأبعاد وهذا ما لم يتوصل البحث لتفسيره بشكل علمى إلا أن الهدف من التجربة تحقق فى تأثر دقة الأبعاد بالتبريد وأن وجود التبريد عاملا هاما فى الحصول على دقة الأبعاد المطلوبة ومظهر جيد للطباعة حيث تأثر المظهر فى التجربة الثالثة سلبا فى عدم وجود التبريد.

الخلاصة Conclusion:

هناك علاقة واضحة بين جودة الطباعة ثلاثية الأبعاد بخيوط متعدد حمض اللاكتيك PLA وبين التبريد الذى يتعرض له النموذج أثناء الطباعة ففى غياب التبريد يبدو التأثر السلبى واضحا على المظهر الجمالى للنموذج وأيضا على دقة الأبعاد فمن المشكلات شديدة التأثر بالتبريد هى مشكلة تشوه الاجزاء البارزة والجسور والنهايات الدقيقة ودقة الأبعاد ويأتى التحكم فى التبريد من خلال الفهم والضبط الصحيح لإعدادات التبريد ببرنامج التقطيع هاما لرفع جودة المطبوع كما نجد أن النموذج يتأثر بكيفية توزيع الهواء أثناء الطباعة فى حالة إحتواءة على أجزاءا بارزة أو جسورا والتى تتم طباعتها دون أى دعم أسفلها لذا فإجراء مزيد من البحث حول التصميمات المختلفة من قنوات توزيع الخواء الملحقة بتبريد الجزء يمثل توصية للبحث وأيضا إجراء المزيد من البحث فى أثر التبريد على الخيوط الأخرى من اللدائن الحرارية المختلفة حيث اهتم البحث بالتطبيق على خيوط الـPLA دون غيرها.

المراجع References:

1. شلتوت، محمد – العبد الله، ديمة (٢٠١٩)، الطباعة ثلاثية الابعاد فى التعليم (أسس ومهارات النمذجة التعليمية) ، الرياض / مكتب التربية العربى لدول الخليج.
2. صيام ،إبراهيم (مارس ،٢٠١٥)، كيف تعمل الطباعة المجسمة (ثلاثية الأبعاد). جمعية أنا أصدق العلم.تم استرجاعة فى ٢٠٢١/٤/١٨على الرابط https://www.ibelieveinsci.com/?p=4920
3. Prusa, Josef (2019). Basics of 3D printing.book. Published by:Prusa Research s.r.o.
4. Aranda, Sean. (2020). 3D Printing Failures, How to Diagnose & Repair all Desktop 3D Printing Issues.book. Monee,IL.
5. PrintLab. (April 2018). 3D Printing Guide for Teachers. Retrieved April 18, 2021, from https://classroom.weareprintlab.com/p/3d-printing-guide-for-teachers
6. Quintans, desi. (2016, February 21). The effects of fan types and fan shrouds on overhangs and warping in 3D printing. Retrieved April 12, 2021, from http://www.desiquintans.com/coolingtests#thingstested
7. Noorani, Rafiq.(2018)- 3D Printing Technology, Applications, and Selection-Book- Taylor & Francis Group, LLC
8. Stevenson, Kerry. (2016, November 14). The Critical Importance of Cooling During Plastic 3D Printing. Blog. Retrieved March, 2021, from https://www.fabbaloo.com/blog/2016/11/14/the-critical-importance-of-cooling-during-3d-printing
9. Pelonis, Sam. (2013, December 12).Using Cooling Fans for 3D Printing. Retrieved April 19, 2021, from https://www.pelonistechnologies.com/blog/using-cooling-fans-for-3d-printing
10. Pollette, Chris & Crawford, Stephanie. (2019, September 26). How 3-D Printing Works. Article. Retrived April 18,2021, from https://computer.howstuffworks.com/3-d-printing.htm
11. 3dlink: “Fdm-technologie 3d printer”, 2016, Retrived March,2021 from https://www.3dlink.nl/2016/08/23/dddropprinter-in-zeeland/fdm-technology/.
12. my3dconcepts.com (2017, April 28), HOW 3D PRINTING WORKS?. Retrieved April 17,2021 from http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/
13. my3dconcepts.com (2017, April 28), Main Components Of Fdm 3d PRINTERS. Retrieved April 17,2021 from http://my3dconcepts.com/explore/main-components-of-desktop-3d-printers/
14. Stemfie3D. (2019, July 1). File:3D printing calibration part-cooling fan airflow.svg, Retrieved April 16,2021 from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_printing_calibration_part-cooling_fan_airflow.svg
15. Eipionezero (2015, May 21), 2-in-1 fan duct: extruder and filament cooler for E3D V6 and others, Retrieved April 12,2021 from https://www.thingiverse.com/thing:839620