دراسة تأثير إعدادات مختلفة لعملية الطباعة ثلاثية الأبعاد 3D في خصائص المنتج من ناحية نعومة السطح وزمن التصنيع

م. يزن الموسى[1]

1 باحث حاصل على ماجستير في قسم هندسة التصميم الميكانيكي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.
(yazan.almosa@damascusuniversity.edu.sy)

الملخص

يهدف البحث المقدم إلى دراسة تأثير إعدادات عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد3D المختلفة في خصائص النعومة السطحية وزمن التصنيع لمنتج PLA. استُخدمت تقنية نمّذجة الترسيب المنصهر (FDM) لتصنيع عينات الاختبار. والاستفادة من الميزات التي تقدمها الطباعة ثلاثية الأبعاد لصالح الاستفادة منها في الصناعات الأخرى وإنتاج منتجات ذات جودة عالية وبتكلفة وزمن اخفض ما يمكن. حيث تهدف المقارنة إلى إظهار قدرة ومرونة الطباعة 3D لإنتاج النماذج الأولية بسرعة كبيرة إلى جانب انخفاض التكلفة والزمن المستغرق لإنتاج نموذج أولي واحد. تم اختيار نموذج (مسنن توقيت في محركات الاحتراق الداخلي) واعتماده ليتم دراسته وتصميم نموذج حاسوبي بواسطة برنامج Soldworks ومن ثم تصديره لبرنامج Cura ليتم معالجة عملية التقطيع لطبقات. وتحديد مسارات تحرك رأس الطباعة. وتعيين الإعدادات الاخرى لطباعة. نتائج البحث أظهرت أن تأثير كل من سماكة طبقة الطباعة ودرجة الحرارة وسرعة الطباعة وتحرك للرأس الطباعة هو محدد رئيسي لموصفات المنتج النهائي. أفضل نتائج كانت بأقل سماكة وأخفض سرعة مختارة. وفق التجربة الثالثة.

الكلمات المفتاحية: الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D) - نموذج حاسوبي – تقطيع الطبقات – الترسيب المنصهر (FDM).

1.المقدمة:

سوف نشهد في العقود التالية، فيما لو استمرت وتيرة التطور الصناعي والعلمي في كوكبنا على هذا المنوال، تغيرات جذرية في طريقة عيشنا في كثير من المجالات وخاصة المجالات الصناعية والانتاجية. احد تلك التقنيات والتحديثات هو تطور امكانيات الطباعة ثلاثية الابعاد. حيث ستتوسع استخداماتها بابتكار طرق جديدة لتلبية احتياجاتنا و على كافة الأصعدة مما يؤثر بطريقة او أخرى على طبيعة حياتنا و تفتح لنا افاق جديدة لمستقبل التكنولوجيا و التطور و كمساهمة في ايضاح جزء من هذا التطور تم إعداد هذا المشروع ليكون دليلا على نشر الوعي بالطباعة ثلاثية الابعاد والإمكانيات التي يمكن الاستفادة منها. تم تسليط الضوء على الإمكانيات المميزة للطباعة ثلاثية الابعاد أو ما يسمى التصنيع بالإضافة في تشكيل نماذج أولية ذات دقة عالية في الشكل وجودة السطح من حيث النعومة والتفاصيل.

تعد قدرة ومرونة تقنية الطباعة ثلاثية الابعاد على انتاج منتجات نهائية أو نماذج أولية يمكن استخدامها في تقنيات تصنيع أخرى لتصنيع منتجات نهائية. وذلك ابتداءً من ملف حاسوبي لاحد برامج الCAD (COMPUTER ADD DESGIN)، حيث يمكن تعديل تفاصيل النموذج والمجسم الحاسوبي وفقاً لمتطلبات الإنتاج ودون تكاليف ملموسة ووفق زمن صغير نسبيا بالمقارنة مع تعديل النماذج الاولية والمجسمات بالطرق التقليدية.

1.الدراسات المرجعية:

1.1.الدراسة المرجعية الأولى:

The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness.

تم دراسة تأثير إعدادات عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد المختلفة على خصائص مقاومة الشد وصلابة بوليمر PLA. استُخدمت تقنية نمذجة الترسيب المنصهر (FDM) لتصنيع عينات الاختبار باتجاهات بناء مختلفة، كذلك زاوية اتجاه المسح، وارتفاع الطبقة متغيرة. وتم دعم التجارب بصور مجهرية ضوئية لتحديد بنية وجودة سطح الطباعة ثلاثية الأبعاد، وتحديد أنماط الكسر. ولسد الفجوة المعرفية حول سلوك المواد المطبوعة ثلاثية الأبعاد، تم تقييم الارتباط بين الصلابة ومقاومة الشد بناءً على الأداء المحقق من معلمات الطباعة المدروسة. لم تُولَ هذه العلاقة اهتمامًا كبيرًا في الدراسات السابقة، مما يشير إلى ضرورة تقييم هذا الارتباط لفهم سلوك المواد المصنعة ثلاثية الأبعاد بشكل كامل. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن أعلى قيم لمعامل يونغ ومقاومة الشد القصوى قد لوحظت في عينات اتجاه الحافة (1.896 ± 0.044 GPa و49.12 ± 0.78 MPa،، على التوالي). في الوقت نفسه، كانت أفضل استطالة عند الكسر(3.13%) في عينة كان سماكة الطبقة 0.1 مم. علاوة على ذلك، لوحظ أن الصلابة ومقاومة الشد تتناسبان طرداً عندما يكون معامل اتجاه الطباعة هو المتغير .[1]

2.1.الدراسة المرجعية الثانية:

A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics.

نمذجة الترسيب المنصهر (FDM) هي عملية تصنيع إضافيAdded) (Manufacturing تُستخدم غالبًا لتصنيع نماذج أولية وأجزاء هندسية معقدة. تكتسب هذه العملية رواجًا متزايدًا نظرًا لتقليصها زمن دورة تطوير المنتجات دون الحاجة إلى أدوات باهظة الثمن. ومع ذلك، فإن تسويق تقنية FDM في مختلف التطبيقات الصناعية محدود حاليًا بسبب العديد من العيوب، مثل ضعف الخصائص الميكانيكية، وضعف جودة السطح، وانخفاض دقة الأبعاد. تتأثر جودة المنتجات المُنتجة بتقنية FDM بمعايير عملية مختلفة، مثل سماكة الطبقة، واتجاه البناء، وعرض الشبكة، أو سرعة الطباعة. يعتمد ضبط معايير العملية ونطاقها على مقطع آلات FDM. تُحدد مواد الخيوط، وأبعاد الفوهة، ونوع الآلة نطاق المعايير المختلفة. يُعتقد أن الضبط الأمثل للمعايير يُحسّن جودة الأجزاء المطبوعة ثلاثية الأبعاد (3D)، وقد يُقلل من أعمال ما بعد الإنتاج. تُراجع هذه الورقة البحثية بشكلٍ مُكثّف أحدثَ الدراسات حول تأثير المُعاملات على جودة القطع، والأبحاث الحالية حول تحسين مُعاملات العمليات. كما تُحدّد أوجه القصور في الأعمال الحالية، وتُقيّم التحديات وفرص العمل في هذا المجال، وتُقترح اتجاهاتٍ للأبحاث المُستقبلية في هذا المجال.[6]

2.أهمية البحث:

حداثّة تقنية التصنيع بالإضافة والتي تنحدر منها الطباعة ثلاثية الأبعاد. استوجب الحاجة للبحث في هذه الطريقة لقلة الدراسات في هذا الصدد إلى جانب ازدياد أهمية هذه الطريقة غير التقليّدية في التصنيع. كما أن البحث يضيئ على ميزة مهمة وهي إمكانية تقليص زمن دورة تطوير المنتجات دون الحاجة إلى أدوات باهظة الثمن. بدأً من النموذج الحاسوبي ومروراً بإعدادات الطباعة.

3.الطرائق ومواد البحث:

1.3.تحوّيل الفكرة الى منتج باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد

استخدمت الطباعة ثلاثية الأبعاد في وقت مبكر لتصنيع النماذج الأولية السريعة في شركات انتاج السيارات والمطورين. حيث ان العديد من شركات السيارات و بالأخص التي تتعامل مع السيارات الرياضية و الفورملا ون F1 التي قلدت خطى شركات صناعة الطائرات باستخدامها الطباعة ثلاثية الابعاد .[2]

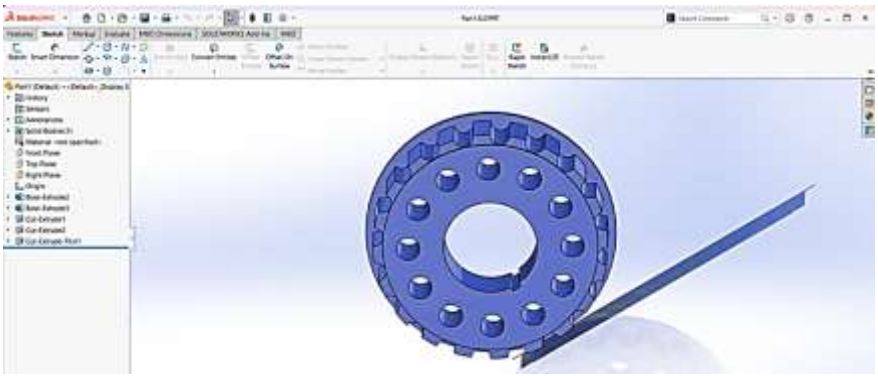
كذلك تستخدم الطباعة ثلاثية الأبعاد في قطاع صناعة السيارات وتطوير المواد المستخدمة والاستفادة منها في تصنيع قطع السيارات. الكثير من شركات صناعة السيارات تنظر الى هذا النوع من الطباعة لاستخدامها في خدمات ما بعد البيع من حيث أنتاج قطع الغيار عند الطلب. [3] يوضح في الشكل 1 (a,b) المنتج الذي يراد دراسته (مسنن توقيت في محركات الاحتراق الداخلي).

b a

الشكل 1: المنتج الذي يراد دراسته (مسنن توقيت في محركات الاحتراق الداخلي)

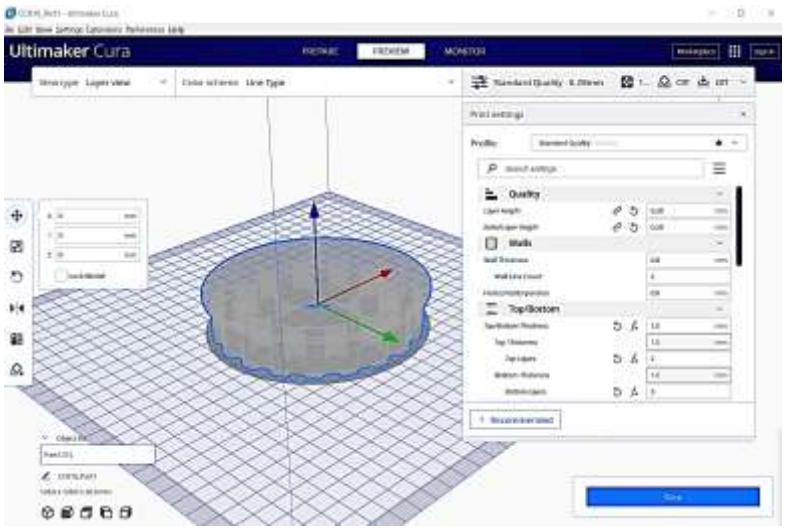
2.3.رسم/تصميم المنتج باستخدام الحاسب CAD Design

هناك العديد من البرامج التي يمكن استخدامها في هذه الحالة، بعضها مجاني والآخر مدفوع. هنا سوف نستخدم البرنامج الشهير لتصميم الميكانيكي Soldworks. حيث يبين الشكل 2 واجهة البرنامج والرسم الثلاثي الأبعاد للمنتج (المسنن) بأبعاده الحقيقية.



الشكل 2: واجهة برنامج Soldworks والرسم الثلاثي الأبعاد للمنتج

ثم يتم ترحيل ملف التصميم للمنتج إلى برنامج الخاص بالتقطيع وذلك بصيغة STL. هنا نستخدم برنامج Cura. وذلك لأجل تقطيع المجسم الحاسوبي لطبقات ليتم طباعتها. سماكة الطبقة، سرعة الطباعة، سرعة تحرك رأس البثق، والكثير من الميزات والمتغيرات يتم تحديدها وأمثلتها في برنامج التقطيع بما يتوافق مع المنتج المراد طباعته. الشكل 3 يوضح المجسم داخل برنامج القطيع.



الشكل 3 يوضح المجسم داخل برنامج القطيع.

4.المعايير الرئيسية وتأثيراتها على الخواص الميكانيكية:

تقوم الطابعة "بِرَسم" المنتج بواسطة البلاستيك المذاب، وهذا البلاستيك ما يلبث أن يتجمّد مرّة أُخرى، ويتم تصنيع المنتج من خلال بنائه طبقة فوق طبقة (Layer).

يتأثر الأداء الميكانيكي لأجزاء PLA المطبوعة ثلاثية الأبعاد بشكل كبير بمعايير عملية مختلفة. تشمل العوامل الرئيسية (درجة حرارة الطباعة، سماكة الطبقة، كثافة الحشو، سرعة الطباعة، زاوية المسح، اتجاه البناء، ونمط التعبئة). يمكن أن يؤثر تعديل هذه المعايير (المدخلات) بشكل كبير على الخصائص الميكانيكية مثل مقاومة الشد، ومقاومة الضغط، والصلابة الكلية، ونعومة السطح الخارجي. كما أن الزمن الذي تستغرقه الطابعة لإنتاج نموذج واحد يختلف تبعاً للإعدادات وعوامل الطباعة الرئيسية.[4]

1.4.نماذج الانحدار:

يمكن تطوير نماذج الانحدار للتنبؤ بالخصائص الميكانيكية لأجزاء PLA بناءً على معايير العملية المختارة، مما يتيح تحكمًا أكثر دقة في المنتج النهائي.

باختصار، يُعد فهم معايير عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد والتحكم فيها بدقة أمرًا بالغ الأهمية لتحقيق الأداء الميكانيكي المطلوب لأجزاء PLA. من خلال تحسين متغيرات مثل درجة حرارة الطباعة، وسماكة الطبقة، وكثافة الحشو، وسرعة الطباعة، يُمكن من إنتاج منتجات مطبوعة ثلاثية الأبعاد مقاومة ومتينة وعالية الجودة. وعليه تم تصميم ثلاث تجارب لإنتاج نفس المنتج وفق تغير في المتغيرات الخاصة بطباعة ودراسة التأثير الحاصل على المواصفة الميكانيكية (نعومة السطح) حيث تم اعطاء قيمة النعومة بشكل نسبي من نعومة المنتج (مسنن التوقيت) المراد صناعة نموذج أولي منه. تم قياس درجة النعومة وفق طريقة الملامح (Profilometry) حيث تم استخدام مسبار (قلم) يتحرك ببطء على سطح المادة لتتبع التعرجات السطحية ومنه

يتم حساب معلمة الخشونة 'Ra'(متوسط الخشونة). وعلى مواصفة زمن التصنيع.[5] تم تثبيت متغيرات الطباعة المذكورة في الجدول 1.

الجدول1 : بارامترات الطباعة الثابتة لكل التجارب

نمط الملئ Infill Pattern	كثافة الملئ Infill Density	سماكة السفلى والعليا T/b thickness	الطبقات السفلى والعليا Top/bottom layer	سماكة الجدار Wall Thickness	عدد الجدران Wall count
Cubic	20%	1.0 mm	8	1.0 mm	4

علماً أنه لم نتمكن من قياس باقي المواصفات الميكانيكية لعدم توفر أدوات الاختبار والقياس. كما تم القياس على تغير فقط خمس متغيرات والتي تؤثر على زمن الطباعة ونعومة السطح.

الشكل 4: تطابق الشكل بين المطبوع والمنتج الاساسي

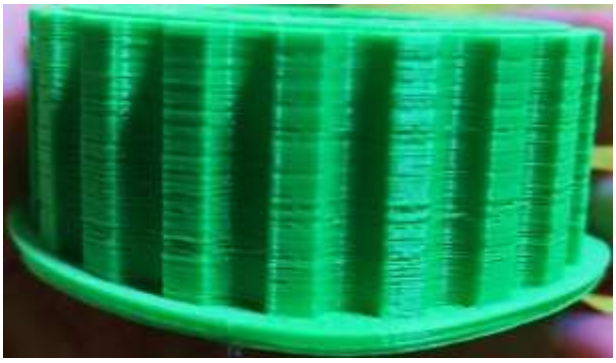
2.4.التجربة الأولى:

تُعطى متغيرات الطباعة للتجربة الاولى وفق الجدول 2.

الجدول 2: بارامترات الطباعة لتجربة الاولى

سرعة التحرك Travel speed	سرعة الملئ Infill Speed	سرعة الطباعة Print Speed	درجة الحرارة Printing temperature	سمك الطبقة Layer Height
150 mm/sec	50 mm/sec	50 mm/sec	200 c	0.2 mm

الشكل 5: عينة1



الشكل 6: جانب جدار عينة 1

يمثل الشكل 4 العينة التي تم طباعتاها وفق المتغيرات في الجدول 2. حيث استغرقت العملية 5.5 ساعة واستهلكت 12 متراً من خيط PLA. وكانت نعومة السطح الخارجي وفق ما يظهر الشكل 5 بنعومة نسبية تقدر ب65%.

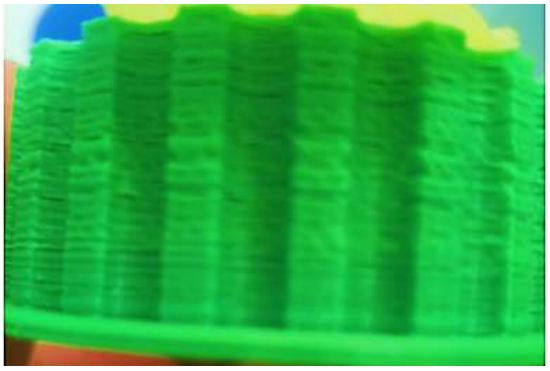
3.4.التجربة الثانية

تُعطى متغيرات الطباعة للتجربة الثانية وفق الجدول 3.

الجدول 3: بارامترات الطباعة التجربة الثانية

سمك الطبقة **Layer Height**	درجة الحرارة **Printing temperature**	سرعة الطباعة **Print Speed**	سرعة الملئ **Infill Speed**	سرعة التحرك **Travel speed**
0.16 mm	200 c	45 mm/sec	45 mm/sec	140 mm/sec

الشكل 7: العينة رقم 2



الشكل 8: جانب جدار العينة رقم 2

يمثل الشكل 6 العينة التي تم طباعتها وفق المتغيرات في الجدول 3. حيث استغرقت العملية 6.11 ساعة واستهلكت 12 متراً من خيط PLA. وكانت نعومة السطح الخارجي وفق ما يظهر الشكل 7 بنعومة نسبية تقدر ب60%. انخفضت النعومة وفق التجربة الثانية بالمقارنة مع التجربة الأولى ويظهر ذلك بالمقارنة بين الشكل 8 والشكل 6. السبب في انخفاض متوسط درجة النعومة على الرغم من تخفيض سماكة درجة الطباعة، لأن المتغيرات الأخرى (درجة الطباعة والسرعة) لم تتوافق من تخفيض سماكة الطبقة. (وهذا هو الهدف المقصود من وراء التجارب الثلاث. أي دراسة تأثير متغيرات الطباعة المختلفة على مواصفات الميكانيكية للمنتج سلباً وإيجاباً).

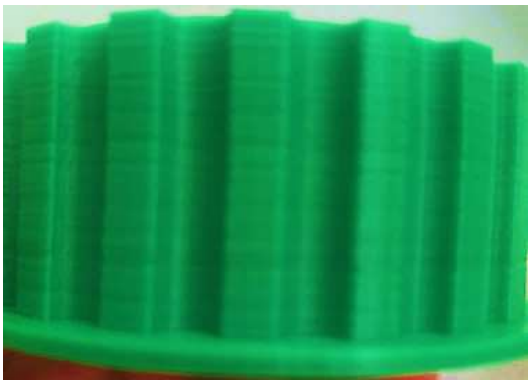
4.4.التجربة الثالثة

تُعطى متغيرات الطباعة للتجربة الثانية وفق الجدول 4.

الجدول 4: بارامترات الطباعة لتجربة الثالثة

سرعة التحرك Travel speed	سرعة الملء Infill Speed	سرعة الطباعة Print Speed	درجة الحرارة Printing temperature	سمك الطبقة Layer Height
130 mm/sec	40 mm/sec	40 mm/sec	205 c	0.12 mm

الشكل 9: العينة رقم 3



الشكل 10: جانب جدار العينة 3

يمثل الشكل 8 العينة التي تم طباعتها وفق المتغيرات في الجدول 4. حيث استغرقت العملية 10.25 ساعة واستهلكت 12 متراً من خيط PLA. وكانت نعومة السطح الخارجي وفق ما يظهر الشكل 9 بنعومة نسبية تقدر ب80%.

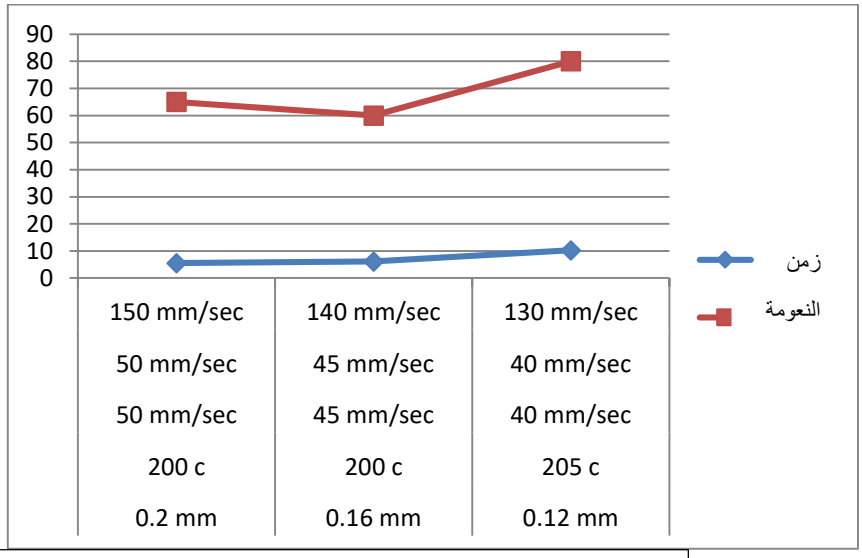
5.مقارنة النتائج

تُعطى النتائج وفق الجدول 5 حيث جمعت المدخلات والمخرجات معاً للتجارب الثلاث.

الجدول 5

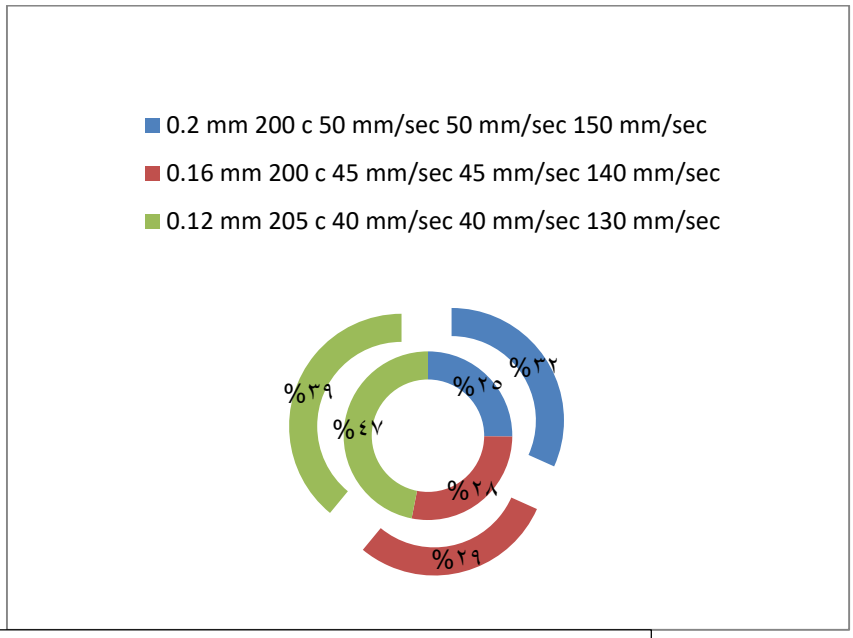
	مدخلات					مخرجات	
رقم التجربة	سمك الطبقة	درجة الحرارة	سرعة الطباعة	سرعة الملئ	سرعة التحرك	نعومة السطح	الزمن Hours

		Travel speed	Infill Speed	Print Speed	Printing temperature	Layer Height	
5.5	65%	150 mm/sec	50 mm/sec	50 mm/sec	200 c	0.2 mm	**1**
6.11	60%	140 mm/sec	45 mm/sec	45 mm/sec	200 c	0.16 mm	**2**
10.25	80%	130 mm/sec	40 mm/sec	40 mm/sec	205 c	0.12 mm	**3**



المخطط 1: منحنيان المخرجات تابعان لمتغيرات الطباعة لتجارب الثلاث

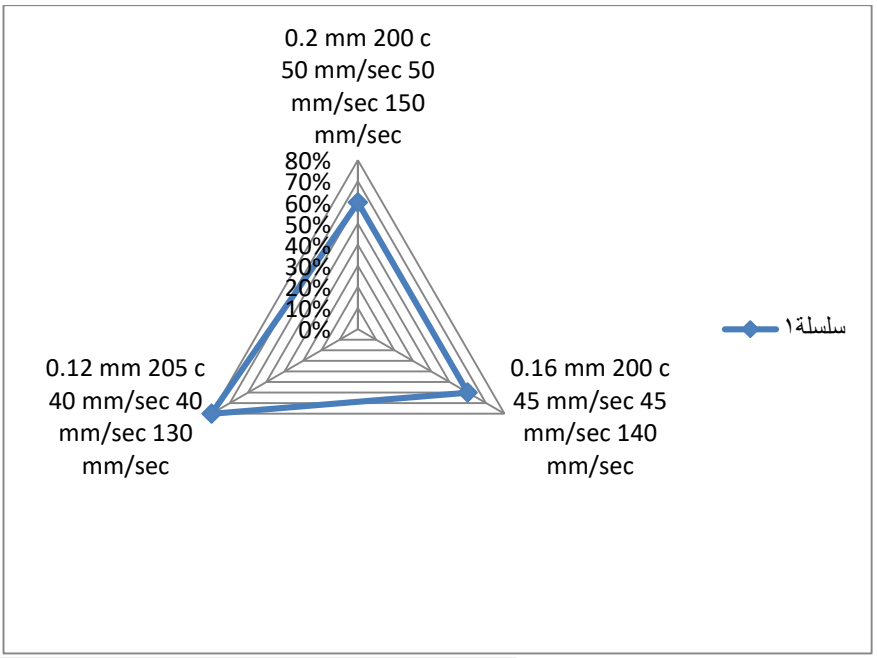
يمثل المخطط 1 منحنيان لتغير مخرجات متغيرات الطباعة بعد اجراء ثلاث تجارب وتحصيل النتائج من كل عينة بما يخص مواصفة درجة النعومة وزمن المستغرق لإنجاز الطباعة.



المخطط 2: نسب النعومة منسوبة لزمن التصنيع المستغرق

يمثل المخطط 2 تبيان نسبة النعومة بين العينات الثلاث منسوبة للزمن الذي استغرقته الطابعة لإنتاج نفس العينة وباستخدام نفس الطابعة.

يوضح هذا أهمية خفض سرعة حركة رأس الطباعة (ازدياد زمن التصنيع) وتأثير هذه المواصفة على درجة النعومة لسطح. وعليه فإن العلاقة بين النعومة وزمن التصنيع علاقة لها تأثير على خواص المنتج. ومن المخطط نلاحظ فإن المنتج وفق التجربة الثالثة والمميز باللون الأخضر هو الأفضل من ناحية المردود ومواصفة النعومة.



المخطط 3: ازدياد مواصفة النعومة عند النقطة الثالثة (العينة 3)

المخطط 3 يوضح النقطة التي تم فيها الحصول على أعلى نعومة من خلال اعطاء الطابعة معلمات معالجة محددة لإنتاج عينة محددة، وباستخدام نفس نوع المادة PLA.

6.مناقشة النتائج العملية:

في هذا البحث، طُبعت مادة PLA (المادة البلاستيكية اللدنة حرارياً) باستخدام تقنية FDM مع تغيير خمس معلمات معالجة (سماكة الطبقة، درجة الحرارة، سرعة الطباعة، سرعة الملء، سرعة التحرك) وعليه تم دراسة تأثير تغير المعاملات الخمسة على ثلاث عينات. تم مقارنة النتائج وفق المخططات 1،2،3. حيث لوحظ أنه مع تقليل سماكة طبقة الطباعة (layer height) من 0.2 mm الى 0.16 mm يجب ان تزداد النعومة نظرياً، لكن ما حدث بتجربة يؤكد اهمية أمثّلة المتغيرات لكل سماكة طبقة مختارة وذلك لتحقيق ارتباط والتصاق للطبقات المتتالية لتحقيق نعومة سطح مطلوبة ومواصفات ميكانيكية جيدة نسبياً. وهذا ما لوحظ عند اختيار سماكة طبقة لطباعة بقياس 0.12 mm وتغير المتغيرات لمتغيرات اخرى تناسب السماكة الطبقة المطلوبة. وهذا ما أدى للحصول على مواصفة نعومة افضل من التي تم الحصول عليها في التجارب السابقة.

7.التوصيات:

استكمال التجارب ولاختبارات مع تغيير ثلاثة معلمات معالجة (اتجاه البناء، وزاوية اتجاه المسح الضوئي، وسمك الطبقة). ثم دراسة قوة الشد وصلابة العينات المطبوعة، وتقُيِم الارتباط بينهما بما يتوافق مع السلوك المُكتسب من إعدادات الطباعة المُختبرة.

الخاتمة

طريقة التصنيع بالإضافة هي من الطرق الحديثة نوعياً والتي تتفرع منها عمليات التصنيع بواسطة الطابعات ثلاثية الأبعاد والتي مازالت تحت التحديث والاختبار. لهذا هنالك حاجة لاستمرار اجراء ابحاث وتجارب أكاديمية وبحثية لإغناء المحتوى العلمي وسد الثغرات ومعرفة الإمكانيات لهذه الطريقة وامكانية استغلالها.

المراجع:

[1] Hanona M. , Dobosa J. ,Zsidaia L. " The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness" .10th CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technologies (DET 2021).

[2] C. Education, "What is 3D Printing," [Online]. Available: https://www.createeducation.com/about-us/introduction/. [Accessed 3 /5/ 2025].

[3] U. Brekeley, "Berkeley Mechanical Engineering," [Online]. Available: https://me.berkeley.edu/resources/student-machine-shop/. [Accessed 3 /5/ 2025].

[4] A. A. J. L. C. F. Kunz, "Innovation Infrastructure& Services. Switzerland Innovation Park Biel," 2017.

[5] AMFG, "3D Printing Support Structures: A Complete Guide," 17 October 2018. [Online]. Available: https://amfg.ai/2018/10/17/3d-printing-support-structures-guide/. [Accessed 4 /6/ 2025].

[6] J. O'Connell, "3D Printing Infill: The Basics for Optimal Results," ALL3DP, 24 February 2022. [Online]. Available: https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/. [Accessed 4 /6/ 2025].

Studying the effect of different 3D printing process settings on product properties in terms of smoothness and manufacturing time.

Abstract

The presented research aims to study the effect of different 3D printing process settings on the surface smoothness properties and manufacturing time of a PLA product. Fused deposition modeling (FDM) technology was used to manufacture test samples. The advantages offered by 3D printing can be utilized in other industries to produce high-quality products at the lowest possible cost and time. The comparison aims to demonstrate the ability and flexibility of 3D printing to produce prototypes at high speeds, along with the low cost and time required to produce a single prototype. A model (a timing gear in an internal combustion engine) was selected and approved for study, and a computer model was designed using Soldworks. The model was then exported to Cura to process the layer-cutting process, determine the print head movement paths, and set other printing settings.

Keywords: 3D printing, computer model, layer−cutting, Fused deposition modeling (FDM).