



الجمهورية العربية السورية  
جامعة دمشق  
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

## تصنيع آلة نمذجة بترسيب المصهور (FDM) ودراسة تأثير بارامترات العملية على دقة النموذج

**Manufacturing a Fused Deposition Modeling Machine (FDM) and study the effect of process parameters on the prototype accuracy**

أطروحة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة الأتمتة الإنتاجية - قسم  
التصميم الميكانيكي

إعداد المهندس

محمد جلال الخوام

المشرف العلمي

الدكتور المهندس: محمد بسام أبو حرب

العام الدراسي

٢٠٢٢

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا

الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ}

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

(سورة المجادلة - الآية ١١)

الحمد لله

إلى كل من قدّم لي يد العون والمساعدة ،وعلمني أن أكبر الأعمال لا تتم إلا بالصبر والإصرار إلى والديّ  
العزيزين مثلي الأعلى في الوفاء، أساتذتي الكرام الذين وهبوني شغف المعرفة والاطلاع ، و صاغوا لنا  
علمهم حروفاً وكلمات،

إلى كلّ من أنار لي شعلة في ظلمة الدرب  
إلى كلّ من كان ينبوعاً لا يملّ العطاء.

ألبسهم الله ثوب الصحة والعافية

# شُكْرُهُ وَعِرْفَانُهُ

أُتَوَّجِهُ بِالشُّكْرِ الْكَبِيرِ لِشَرَفِي الدُّكْتُورِ الْمُهَنْدِسِ مُحَمَّدِ جَمَالِ نَمْرَةَ، وَالَّذِي أَكُنُّ لَهُ كُلَّ التَّقْدِيرِ عَلَى الْعَوْنِ الْكَبِيرِ الَّذِي قَدَّمَهُ لِي خِلَالِ مَدَّةِ دِرَاسَتِي لِمَرْحَلَةِ الْمَاجِسْتِيرِ، فَقَدْ اسْتَفَدْتُ مِنْ تَوَجِيهَاتِهِ الْقِيَمَةَ لِإِعْدَادِ دِرَاسَتِي بِشَقِيهَا الْمَرْجِعِي وَالْعَمَلِي، وَلاَبَدٍ لِي أَيْضاً مِنْ تَوَجِيهِ الشُّكْرِ لِقِسْمِ التَّصْمِيمِ الْمِيكَانِيكِيِّ خُصُوصاً وَإِدَارَةِ الْكَلِيَّةِ عَمُوماً، عَلَى إِتَاحَةِ الْفُرْصَةِ لِي لِلْقِيَامِ بِبَحْثِي، وَإِجْرَاءِ الْإِخْتِبَارَاتِ وَالتَّجَارِبِ الْلاَزِمَةِ ضَمَّنَ مَخَابِرِ الْكَلِيَّةِ.

كَمَا أُتَوَّجِهُ بِالشُّكْرِ وَالْعِرْفَانِ لِعَائِلَتِي وَزَمَلَائِي الَّذِينَ سَانَدُونِي خِلَالِ هَذِهِ الْفَتْرَةِ، وَحَتَّى تَمَامِ إِنْجَازِ هَذِهِ الْأَطْرُوحَةِ، رَاجِئاً مِنَ اللَّهِ عَزَّ وَجَلَّ التَّوْفِيقَ لِي وَلَهُمْ، وَلِكُلِّ مَنْ وَقَفَ إِلَى جَانِبِي، خِلَالِ السَّنَوَاتِ الْمَاضِيَةِ.

## Table of Contents فهرس المحتويات

|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| III..... | المُلخص                                           |
| IV.....  | قائمة الأشكال                                     |
| X.....   | قائمة الجداول                                     |
|          | <b>الفصل الأول:</b>                               |
| .1.....  | الإطار العام للبحث                                |
| 1.....   | المقدمة                                           |
| 1.....   | أهمية البحث                                       |
| 2.....   | المشكلة العلمية للبحث                             |
| 2.....   | الهدف من البحث                                    |
| 2.....   | فرضيات ومتغيرات البحث                             |
| 3.....   | الطباعة ثلاثية الأبعاد أو النمذجة السريعة         |
|          | <b>الفصل الثاني :</b>                             |
| 16.....  | الدراسات المرجعية                                 |
|          | <b>الفصل الثالث:</b>                              |
| 68.....  | المقدمة:                                          |
| 68.....  | 1.3 ترسيب الجزء المثالي في نمذجة الراسب المنصهر : |
| 72.....  | 2.1.3 قضية التشكيل :                              |
| 73.....  | 1.2.1.3 متوسط القساوة السطحية الجزئية للنموذج :   |
| 82.....  | 4.1.3 النتائج والمناقشة                           |
| 83.....  | 5.1.3 الأمثلة :                                   |
| 87.....  | 6.1.3 الاستنتاجات :                               |

## الفصل الرابع :

|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| 88.....  | تصميم وتصنيع الآلة وأدوات القياس                  |
| 88.....  | 1.4 مقدمة:                                        |
| 90.....  | 2.4 الهيكل والتركيبات الآلية                      |
| 92.....  | 3.4 رأس البثق الحراري                             |
| 94.....  | 4.4 الأجهزة الإلكترونية المستخدمة :               |
| 98.....  | 5.4 الرؤوس الحرارية:                              |
| 100..... | 6.4 المحركات المستخدمة:                           |
| 101..... | 7.4 النتائج والمناقشة:                            |
| 110..... | 8.4 العلاقة بين الزاوية والخشونة للمواد المختلفة: |

## الفصل الخامس :

|          |                                  |
|----------|----------------------------------|
| 118..... | قياس الخشونة من خلال تحليل الصور |
|----------|----------------------------------|

## الفصل السادس :

|           |                                                                   |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| 125.....  | القسم العملي.....                                                 |
| 126.....  | 1. 6 صور العينات                                                  |
| 134.....  | 2. 6 تأثير زاوية الميل في خشونة المشغولة وأبعادها مع تغير السماكة |
| 151 ..... | النتائج                                                           |
| 152.....  | التوصيات.....                                                     |
| 153.....  | المراجع.....                                                      |
| 154.....  | الملحق.....                                                       |

## الملخص

تم في هذا البحث تصميم وتنفيذ آلة طباعة ثلاثية الأبعاد وتنفيذها والتي تعتمد على ترسيب الطبقات المتتالية للمصهور, وقد تم اختبار ثلاث مواد PETG,PLA ABS, وتمت دراسة مجال واسع من الحرارة , وقياس الخشونة لكل مادة , حيث بينت النتائج التجريبية أن:

$T_{ABS} = 250^{\circ}C$  ,  $T_{PETG} = 220^{\circ}C$  ,  $T_{PLA} = 210^{\circ}C$  وهي درجات الحرارة الأنسب للعمل كما بينت النتائج أن مادة ABS هي المادة الأفضل من حيث الخشونة.

الكلمات المفتاحية : الطباعة ثلاثية الأبعاد , درجة الحرارة, الخشونة

قائمة الأشكال الموجودة ضمن البحث :

| رقم الشكل | العنوان                                                                   | رقم الصفحة |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1-1       | نموذجين تم إنتاجهما بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مواد بوليميرية | 2          |
| 2-1       | مراحل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد                                        | 3          |
| 3-1       | تقانة الطباعة المجسمة (SLA)                                               | 4          |
| 4-1       | يوضح نماذج تم إنتاجها بتقانة (SLA)                                        | 5          |
| 5-1       | العناصر الأساسية لتقانة (SLS)                                             | 7          |
| 6-1       | آلة طباعة تعمل بتقانة (SLS)                                               | 8          |
| 7-1       | طريقة عمل آلات الطباعة بتقانة (LOM)                                       | 9          |
| 8-1       | نموذج مصنع بتقانة (LOM)                                                   | 10         |
| 9-1       | طريقة عمل آلات الطباعة بتقانة (PolyJet)                                   | 10         |
| 10-1      | طريقة عمل آلات الطباعة بتقانة (FDM)                                       | 11         |
| 11-1      | طريقة عمل آلات الطباعة بتقانة (DP)                                        | 13         |
| 12-1      | نماذج مصنوعة بطريقة EBM                                                   | 15         |
| 1.3.2     | الزاوية بين مماس السطح والاتجاه العمودي                                   | 22         |
| 1.4.2     | Flash Forge Creator X                                                     | 24         |
| 2.4.2     | الموديل ثلاثي الأبعاد                                                     | 25         |
| 3.4.2     | النموذج النثائي بمواد PLA                                                 | 25         |
| 4.4.2     | المطابقة بين نماذج cad ونموذج المسح الضوئي الرقمي                         | 26         |

|    |                                                             |       |
|----|-------------------------------------------------------------|-------|
| 27 | تقسيم الأبعاد في لنموذج                                     | 5.4.2 |
| 29 | تأثير حرارة الحجرة على لانسباب اللدن                        | 1.5.2 |
| 29 | تأثير عدد الطبقات في الانسباب اللدن                         | 2.5.2 |
| 29 | تأثير طول المقطع في الانسباب اللدن                          | 3.5.2 |
| 30 | تأثير معامل الانكماش في الانسباب اللدن                      | 4.5.2 |
| 30 | تأثير زيادة الطول على الانسباب اللدن                        | 5.5.2 |
| 31 | تأثير عملية الانسباب اللدن على النماذج المصنعة              | 6.5.2 |
| 32 | تأثير عملية الانسباب على النماذج المصنعة                    | 7.5.2 |
| 39 | الانحرافات من أربع مناطق أخرى عند زاوية ترسيب عامودية       | 8.5.2 |
| 40 | مقارنة بين الانحرافات الحاصلة لعينات باستخدام مادة TEM 9085 | 9.5.2 |
| 42 | طابعة Duplicator 4x 3D                                      | 1.6.2 |
| 42 | نماذج تجريبية                                               | 2.6.2 |
| 43 | عينة اختبار                                                 | 3.6.2 |
| 44 | النتائج المستحصلة لاختبار ANOVA باتجاه X,Y                  | 4.6.2 |
| 44 | النتائج المستحصلة لاختبار ANOVA باتجاه Z                    | 5.6.2 |
| 46 | النسبة المئوية لأهمية المعاملات بالنسبة لمستوى X,Y          | 6.6.2 |
| 46 | النسبة المئوية لأهمية المعاملات بالنسبة لاتجاه Z            | 7.6.2 |
| 48 | منحني معدل القص بالنسبة للزوجة                              | 1.7.2 |

|    |                                                                   |         |
|----|-------------------------------------------------------------------|---------|
| 49 | النموذج الأولي                                                    | 2.7.2   |
| 49 | نموذج مختلف الاحجام الداخلية للفوهة                               | 3.7.2   |
| 50 | دراسة استقلالية الشبكة                                            | 4.7.2   |
| 50 | توزيع الشبكة                                                      | 5.7.2   |
| 51 | مخطط تغير درجة حرارة المادة PLA                                   | 6.7.2   |
| 52 | هوط الضغط المحسوب عبر الفوهة                                      | 7.7.2   |
| 65 | شكل الحواف                                                        | (1.1.3) |
| 67 | التدوير في برامج CAD                                              | (2.1.3) |
| 68 | خوارزمية تطبيق الأجزاء                                            | (3.1.3) |
| 72 | نموذج صلب متكافئ الأبعاد في Deas – I                              | 4.1.3   |
| 73 | الموديل الصلب للجزء الإكسيمومتري                                  | 5.1.3   |
| 74 | اتجاهات الترسيب الجزئية المثالية للموديل الصلب                    | 6.1.3   |
| 74 | الموديل الصلب لجزء ثلاثي الأبعاد                                  | 7.1.3   |
| 75 | اتجاهات الترسيب الجزئية المثالية للموديل الصلب لجزء ثلاثي الأبعاد | 8.1.3   |
| 88 | تركيبية المنزلقات الخطية المتعامدة                                | 1.4     |
| 89 | تركيبية المنزلقات الخطية المتعامدة وتركيبية دلتا                  | 2.4     |
| 89 | تركيبية دلتا                                                      | 3.4     |
| 90 | الحلزون ذو الكريات                                                | 5.4     |

|     |                                |      |
|-----|--------------------------------|------|
| 90  | المحامل الخطية الانسحابية      | 6.4  |
| 91  | عملية الحمل الانزلاقي          | 7.4  |
| 91  | مجموعة الحركة الخطية           | 8.4  |
| 92  | تركيب الهيكل                   | 9.4  |
| 92  | تجميع الهيكل                   | 10.4 |
| 92  | الهيكل النهائي                 | 11.4 |
| 93  | رأس البثق الحراري              | 12.4 |
| 93  | رؤوس البثق الحرارية            | 13.4 |
| 94  | المبرّد                        | 14.4 |
| 95  | صورة المتحكم                   | 15.4 |
| 95  | جهاز القيادة الإلكتروني        | 16.4 |
| 96  | مخطط جهاز القيادة              | 17.4 |
| 97  | مخطط توصيل المتحكم مع المحركات | 18.4 |
| 97  | متحكمات A4988                  | 19.4 |
| 99  | متحكمات DRV8825                | 20.4 |
| 99  | صور رؤوس البثق                 | 21.4 |
| 99  | صورة لرأس البثق كاملاً         | 22.4 |
| 100 | صورة الانسداد                  | 23.4 |

|     |                                 |      |
|-----|---------------------------------|------|
| 100 | مجموعة العناصر الإلكترونية      | 24.4 |
| 100 | NOZZLE                          | 25.4 |
| 101 | المحركات الخطوية                | 26.4 |
| 102 | المزدوجة الحرارية               | 27.4 |
| 102 | معايرة الحرارة                  | 28.4 |
| 103 | معايرة الحرارة برنامج CONSOLE   | 30.4 |
| 103 | اصطدام رأس بسريّر التسخين       | 31.4 |
| 104 | رأس البثق الحراري               | 32.4 |
| 104 | سريّر التسخين                   | 33.4 |
| 104 | رؤوس البثق المختلفة             | 34.4 |
| 105 | رسم العينات                     | 35.4 |
| 105 | تصميم النموذج باستخدام AUTO CAD | 36.4 |
| 106 | صور كامل العينات                | 37.4 |
| 107 | عينات اختبار الحرارة PLA 220 OC | 38.4 |
| 108 | عينات اختبار الحرارة ABS 250OC  | 39.4 |
| 108 | عينات اختبار الحرارة Petg220oc  | 40.4 |
| 109 | تأثير زيادة الملف STL           | 41.4 |
| 109 | ظهور حواف                       | 42.4 |

|     |                                                     |      |
|-----|-----------------------------------------------------|------|
| 110 | زاوية الميل والقيمة                                 | 43.4 |
| 111 | جهاز الخشونة                                        | 44.4 |
| 111 | مخطط الخول الزجاجي , وتأثير البنية في الحجم النوعي. | 45.4 |
| 111 | صورة العينة PLA60                                   | 46.4 |
| 112 | عملية قياس الخشونة                                  | 47.4 |
| 112 | البنية السطحية للكرة سماكة 0.25                     | 48.4 |
| 112 | قياس أبعاد العينة                                   | 49.4 |
| 113 | زاوية الميل                                         | 50.4 |
| 119 | صور بعض العينات                                     | 1.5  |
| 120 | صورة العينة تحتوي على مقياس مدرج                    | 2.5  |
| 122 | الزاوية ثيتا                                        | 3.5  |
| 134 | الخشونة عند سماكة 0.35 mm مادة PTEG                 | 1.6  |
| 135 | الخشونة عند سماكة 0.25 mm مادة PTEG                 | 2.6  |
| 136 | الخشونة عند سماكة 0.15 mm مادة PTEG                 | 3.6  |
| 136 | الخشونة عند سماكات 0.35 mm, 0.25 mm, 0.15 mm,       | 4.6  |
| 137 | الخشونة عند سماكة , 0.3 mm مادة PLA                 | 5.6  |
| 137 | الخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة PLA                 | 6.6  |
| 138 | الخشونة عند سماكة , 0.35 , 0.25 mm لمادة PLA        | 7.6  |

|     |                                             |      |
|-----|---------------------------------------------|------|
| 139 | الخشونة عند سماكة 0.35 mm لمادة ABS         | 8.6  |
| 139 | الخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة ABS         | 9.6  |
| 140 | الخشونة عند سماكة 0.15 mm لمادة ABS         | 10.6 |
| 141 | الخشونة عند سماكة 0.35 , 0.25 mm            | 11.6 |
| 142 | الخشونة عند سماكة 0.35 mm للمواد المستخدمة  | 12.6 |
| 143 | الخشونة عند سماكة 0.25 mm للمواد المستخدمة  | 13.6 |
| 144 | الخشونة عند سماكة 0.35 , 0.25 mm            | 14.6 |
| 144 | الطول عند سماكة 0.35 mm, 0.25 mm, 0.15 mm   | 15.6 |
| 144 | الخشونة عند سماكة 0.35 mm, 0.25 mm, 0.15 mm | 16.6 |

قائمة الجداول الموجودة ضمن البحث:

| رقم الجدول | العنوان                                                                   | رقم الصفحة |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.2.2      | بارامترات الترسيب ومستوياتها                                              | 19         |
| 2.2.2      | المستويات التجريبية باستخدام المصفوفة العامودية                           | 19         |
| 3.2.2      | المتوسط بين المسافات وزوايا مختلفة للإزاحة                                | 20         |
| 4.2.2      | مقارنة بين النتائج التجريبية والمرجعية                                    | 20         |
| 1.4.2      | قيم الانحرافات عن مجسم CAD.                                               | 27         |
| 2.6.2      | توزيع تغير هذه البرامترات ضمن تسع حالات (النماذج) حسب مصفوفة تاغوشي       | 43         |
| 3.6.2      | نتائج تحليل ANOVA ل X,Y                                                   | 45         |
| 4.6.2      | نتائج تحليل ANOVA ل Z                                                     | 45         |
| 5.6.2      | بارامترات المراحل الأفضل                                                  | 46         |
| 1.7.2      | الحجم التقريبي للفراغات ذات التحجب الدفين والنسبة المئوية لمحتويات الفراغ | 55         |
| 1.1.3      | بيانات الدخل المتناظرة                                                    | 82         |
| 2.1.3      | بيانات الدخل المتناظرة ملف STL                                            | 85         |
| 3.1.3      | الحل الذي تم التوصل إليه عند قيم مختلفة للاوزان W1,W2                     | 86         |

## ABSTRACT

In this research, the design and implementation of a three-dimensional printing machine based on the deposition of the successive layers of the molten. PETG, PLA, and ABS three materials were tested, wide range of heat and roughness were measured for each substance, Where experimental results showed that

$T_{\text{ABS}} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $T_{\text{PETG}} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $T_{\text{PLA}}=210\text{ }^{\circ}\text{C}$  which is the most suitable working temperature as the results showed that ABS is the best material in terms of roughness.

Key words: three-dimensional printing- temperature-roughness.

**Syrian Arab Republic  
Damascus University  
Faculty of Mechanical and  
Electrical Engineering**



**Manufacturing a Fused Deposition Modeling  
Machine (FDM) and study the effect of process  
parameters on the prototype accuracy**

Thesis for Master Degree at Automating Production Engineering –  
Section of Mechanical Design

**Prepared By**

Eng. Mohamad Jalal Al-Khawam

**Supervised By**

Dr. Eng. Mohamad Bassam Abo Harb

**Academic Year**

2021

# الفصل الأول

## الإطار العام للبحث

### General framework for research

#### المقدمة: Introduction

مع تقدم العلم وتطوره السريع، أصبح من الضروري إيجاد طرق تصنيع مؤتمتة، باستخدام تقانات جديدة للحصول على نماذج أولية بسرعة ودقة من دون الحاجة إلى تصنيعها بالطرق التقليدية ذات التكلفة العالية، وخاصة عندما يكون الإنتاج فردياً، وليس كمياً.

وكمهندسين أصبح من الضروري أن يكون الحاسب جزءاً لا يتجزأ من العمل من دون تجاهل دور المهندس في إنجاح أي عمل يقوم به الحاسب.

ورغم التطور الحاصل في مجال التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD) إلا أن تحويل النموذج الافتراضي إلى منتج أو إلى نموذج مادي يتطلب عمليات طويلة، ومراحل متعددة، ولذلك كان لا بد من طريقة سريعة للقيام بهذه المهمة.

تعد تقانة النمذجة السريعة أو الطباعة ثلاثية الأبعاد إحدى الطرائق التكنولوجية التي تسمح للمصممين بإنتاج نماذج فيزيائية بسرعة ودقة مقبولة إلى حد ما، وتتضمن مختلف عمليات التصنيع للنماذج الفيزيائية الصلبة على تقانات حديثة تغني عن استخدام أدوات التشغيل والتشكيل [1].

#### المشكلة العلمية للبحث :

المشكلة العلمية تتلخص في اعتماد دقة الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام تقنية ترسيب المصهور على بارامترات متعددة ما يستدعي دراسة كل هذه البارامترات من أجل المحافظة على الدقة العالية للنموذج.

#### أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في تصنيع آلة طباعة ثلاثية الأبعاد اختبارية تتيح المجال لاستخدامها في مخبر CAD/CAM كمتاح لإجراء العديد من الدراسات على البارامترات المؤثرة على دقة عملية النمذجة ويمكن من ضبط تلك البارامترات بالشكل الأمثل للحصول على أعلى دقة بأقل زمن ممكن.

## هدف البحث:

تصنيع آلة طباعة ثلاثية الأبعاد تعمل بتقنية النمذجة بترسيب المصهور FDM وتطوير طريقة عمل الآلة لاستخدامها في مخبر CAD/CAM ومن ثم إختبار تأثير البارامترات المختلفة على جودة ودقة النموذج.

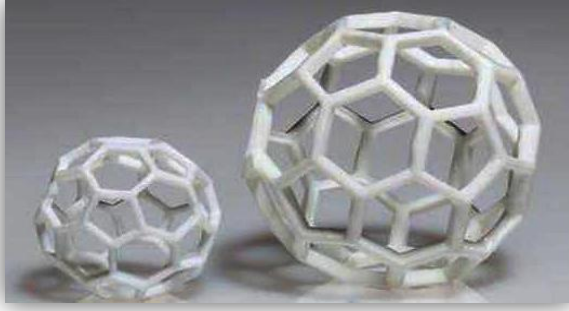
## فرضيات ومتغيرات البحث:

تعتمد دقة نموذج FDM على كل نوع مادة النموذج وقطر رأس الترسيب وسماكة الطبقات المرسبة حيث سيتم في هذا البحث دراسة تأثير كل من تلك المتغيرات على دقة النموذج والسبل المؤدية للحصول على القيم المثلى لها.

## الطباعة ثلاثية الأبعاد أو النمذجة السريعة (RP) Rapid Prototyping:

الطباعة ثلاثية الأبعاد اسم يدل على التقنية التي يتم بواسطتها بناء نموذج حقيقي, انطلاقاً من نموذج مصمم بمساعدة الحاسب , مما يعطي المصممين إمكانية فحص التصميم والاطلاع عليها بصورتها الفيزيائية , وإجراء الاختبارات المختلفة على النماذج قبل البدء بالإنتاج الكمي. إن عملية النمذجة السريعة هي عملية تشغيل تعتمد على مبدأ الإضافة Adding Materials (بناء المجسم من طبقات عدة) , وليس على مبدأ إزالة المادة , كما هي حال أغلب عمليات التشغيل الأخرى مثل التفريز والخراطة[2].

يتم في البداية تحويل النموذج الحاسوبي ثلاثي الأبعاد إلى مجموعة من الشرائح , وذلك باستخدام خوارزميات خاصة لذلك, وبعد ذلك يتم توليد مسار أداة الطباعة , لتتجز كل شريحة على حدة, وترسل تلك المعلومات إلى آلة الطباعة التي تقوم بإنجاز المجسم طبقة تلو الأخرى حتى الحصول على المجسم الكامل.



الشكل (1-1) يوضح نموذجين تم إنتاجهما بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مواد بوليميرية[1].

على الرغم من تعدد الطرق المختلفة للنمذجة السريعة , ولكن كلها تعتمد على الخطوات الأساسية الآتية نفسها وهي:

1- إنشاء التصميم الحاسوبي , باستخدام أحد برامج CAD.

2- تحويل ملف CAD إلى ملف STL.

3- تقسيم ملف STL إلى عدد كبير من الشرائح الرقيقة (Slices).

4- إرسال المعلومات إلى الآلة , لبناء النموذج شريحة فوق أخرى بدءاً من الشريحة القاعدية.

5- عمليات الإنهاء والتنظيف لسطح النموذج , وإزالة الزوائد والمواد الداعمة.



الشكل (1-2) يوضح مراحل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد[1].

تختلف تقانات الطباعة بعضها عن البعض فيما يأتي:

- 1- نوع مادة النموذج , فقد تكون مادة بوليميرية أو معدنية أو مادة سيراميكية أو مواد مركبة.
- 2- الأسلوب الذي يتم من خلاله بناء شرائح الجسم حيث قد تتم العملية بالرش أو الترسيب أو التصليب بالليزر أو بالتليد أو بإضافة مواد رابطة. وسيتم التطرق إلى هذا الموضوع بالتفصيل في الفقرات اللاحقة.

لا تعد تقانة النمذجة ثلاثية الأبعاد بديلاً عن آلة التشغيل المبرمجة (CNC) , وذلك لأن دقة آلات التشغيل المبرمجة أعلى بكثير من دقة الطباعة ثلاثية الأبعاد كما ويمكن تشغيل مواد متنوعة من معدنية وبوليميرية أو حتى سيراميكية.

ولكن عند وجود أشكال معقدة , فإن آلات التشغيل المبرمجة سوف تحتاج إلى زمن كبير جداً , لإنجاز المنتج, وتحتاج إلى معدات إضافية, وتكلفة كبيرة جداً لتشغيل تلك المنتجات. ومن هنا برزت ضرورة استخدام آلات الطباعة ثلاثية الأبعاد في إنتاج النماذج المعقدة بسرعة عالية ودقة جيدة , ومن دون أي معدات إضافية, وبتكلفة مقبولة.

## 2.1. التقنيات المستخدمة للطباعة ثلاثية الأبعاد:

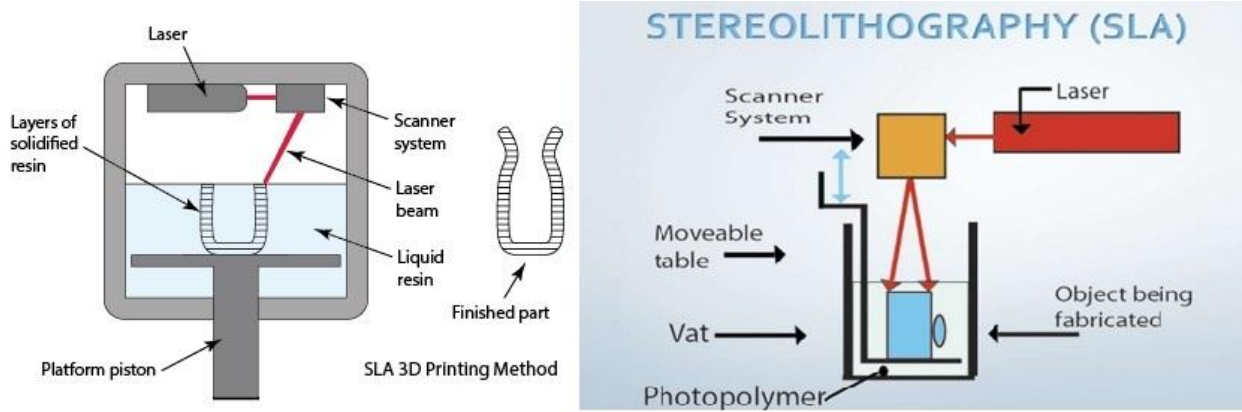
### 1.1.1. الطباعة المجسمة (SLA) Stereo lithography:

في هذه العملية يتم استخدام ريزن سائل حساس للضوء والذي يتحول إلى بوليمير صلب بمجرد تعرضه لشعاع الليزر , ويتم استخدام ليزر الأشعة فوق البنفسجية بكثافة معينة , ولفترة محددة لذلك الغرض[11].

وعند تعرض الريزن السائل للأشعة تتصلب الطبقة السطحية فقط , ويتم تأمين ذلك بجعل كثافة الشعاع أكبر ما يمكن عند السطح.

تتألف الآلة من قاعدة متحركة ضمن وعاء يحتوي على الريزن السائل, وتحتوي الآلة أيضاً على جهاز توليد أشعة ليزر فوق البنفسجية , وماسح ليزري مكون من مجموعة من المرايا الدوارة والعدسات

الخاصة. ويتم استخدام ليزر الهليوم كادميوم (UV Helium-Cadmium) أو ليزر أيونات الأرجون (Argon ion Laser).



الشكل (3-1) يوضح تقانة الطباعة المجسمة (SLA) [10].

يقوم شعاع الليزر بمسح الطبقة الأولى ثم تنخفض القاعدة المتحركة بمقدار سماكة الشريحة المطلوبة, ويجب مراعاة وجود فاصل زمني بين كل عملية مسح ,والعملية التالية, وذلك بانتظار تصلب الرزين بشكل جيد , للحفاظ على سطح مستوٍ وخالٍ من الفقاعات.

تكرر عملية المسح مرة تلو الأخرى حتى الانتهاء من كامل الجسم ,وبعد ذلك يتم رفع الجسم من الوعاء حيث تنزلق المواد غير المتصلبة.

يتم بعد ذلك إزالة الطبقات الداعمة المساعدة ثم يوضع النموذج في فرن الأشعة فوق البنفسجية لإتمام عملية التصلب الكامل.

ومن المهم الإشارة إلى ضرورة استخدام الطبقات الداعمة (وذلك لمنع النموذج من الانحناء نتيجة قوى الجاذبية) , وأيضاً يجب إزالة تلك الطبقات قبل إدخال الجسم للفرن , كونها تكون ضعيفة قبل التصلب النهائي.

تقوم بعض الشركات باستخدام طبقات داعمة شبكية غير مصمتة , لسهولة إزالتها من دون تشويه النموذج.

في الواقع يتم التخطيط لتوضع النموذج في أثناء طباعته, إذ تتم العملية بأسرع ما يمكن, وبأقل كمية من الريزن المستخدم وأقل كمية من الطبقات الداعمة.

يمكن إنتاج منتجات دقيقة جداً بهذه الطريقة. وبأبعاد صغيرة تصل حتى بضعة مايكرومترات.



الشكل (1-4) يوضح نماذج تم إنتاجها بتقانة (SLA) [10]

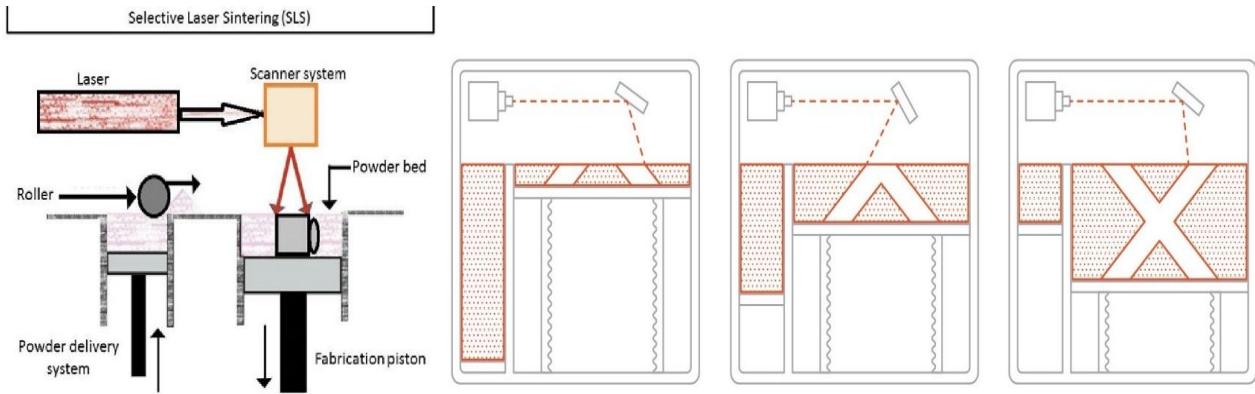
### 2.2.1. التلبيد الليزري الانتقائي (SLS) Selective Laser sintering:

يعتمد المبدأ الأساسي للعمل في هذه التقنية على تلبيد البودرة, من خلال رفع حرارتها عند تعرضها لأشعة الليزر ويمكن استخدام المساحيق المعدنية أو البوليميرية لإنتاج النماذج المطلوبة , ويتم حالياً استخدام كل من مسحوق البوليسترين (Polystyrene Powder) والبولي كربونات (Polycarbonate Powder) ومسحوق البولياميد (Polyamide Powder) حيث يتراوح قطر حبات البودرة من 20-100 مايكرومتر.

يتم مد المسحوق على قاعدة متحركة، ثم يقوم شعاع الليزر بمسح المناطق المطلوب تلييدها . ومن المعلوم أن درجة حرارة التلييد تكون أقل من درجة حرارة الانصهار للمسحوق الملبد.

يستخدم ليزر غاز ثاني أكسيد الكربون (CO2 laser) لتوليد حزمة من الأشعة تحت الحمراء لهذه المهمة، حيث تعد هذه الأشعة مثالية للتسخين، إذ تقلل من التشوه الحراري وتساعد على اندماج الطبقة الحالية مع الطبقة السابقة[11].

وبعد الانتهاء من تلييد إحدى الطبقات تنخفض القاعدة المتحركة بمسافة تعادل سماكة الطبقة المطلوبة، ويرتفع حوض البودرة الجافة الجانبي بمقدار معين، لتأمين كمية المسحوق المطلوبة للعملية التالية، حيث تقوم أسطوانة دوارة متدرجة بنقل المسحوق إلى سطح العمل، وتتم عملية التلييد بالليزر من



جديد، تتكرر هذه العملية حتى إنهاء تشكيل طبقات النموذج بالكامل.

الشكل (1-5) يوضح العناصر الأساسية لتقانة (SLS) [11]

تمتاز هذه التقانة بعدم الحاجة لوجود طبقات داعمة (Support Structure)، بسبب قيام المسحوق غير الملبد بهذه المهمة. كما تمتاز بعدم ضرورة تعريض النموذج لعمليات معالجة إضافية، ويكون سطح النموذج ملائماً لعمليات الطلاء في حال الحاجة، لذلك وبالطبع فمتانة النموذج تكون أكبر من متانة النماذج المنتجة على آلات الـ (SLA).

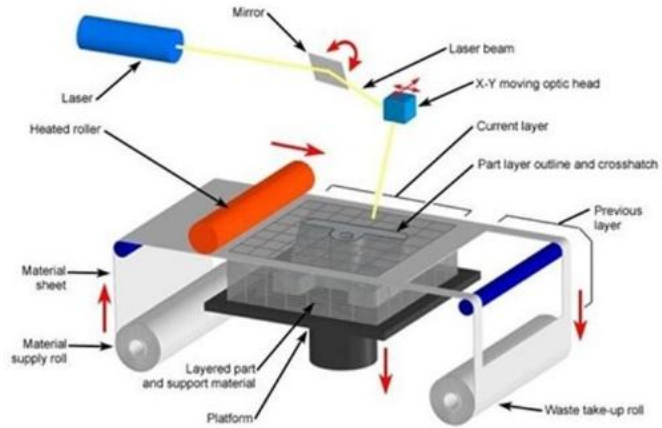
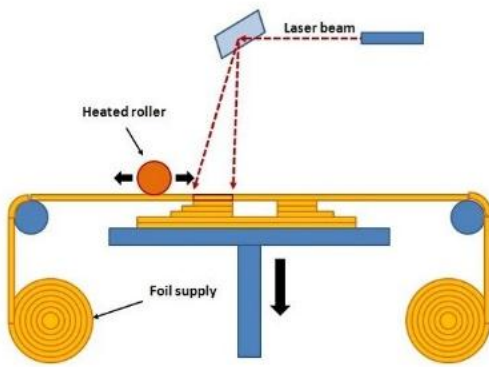
تجدر الإشارة إلى أن ضرورة مراعاة عدم وجود تجاويف داخلية مغلقة في أثناء تصميم النموذج، وذلك لضرورة إخراج المسحوق غير الملبد من تلك التجاويف.



الشكل (1-6) آلة طباعة تعمل بتقانة (SLS)

### 3.2.1. تقانة الصفائح النضدة (LOM): Laminated Object Manufacturing

تعتمد هذه التقانة على تشكيل النموذج من خلال تنضيد عدد كبير من الصفائح بعضها فوق البعض لتشكيل النموذج النهائي، وكل صفيحة تقابل المقطع العرضي للنموذج المصنع. يمكن استخدام أي مادة على شكل صفائح رقيقة كالورق أو رقائق بلاستيكية أو معدنية بحيث تكون مطلية بمواد لاصقة حرارية، غالباً ما تكون الصفائح ملفوفة على أسطوانة التغذية، ثم تنتقل إلى مكان العمل، حيث تتدحرج عليها أسطوانة تسخين بحيث تلتصق تلك الطبقة مع الطبقة التي تحتها [13].



الشكل (7-1) طريقة عمل آلات الطباعة بتقانة (LOM) [13].

ثم يتم قص الصفیحة من خلال ماسح لیزري، لتشکیل المقطع العرضي المطلوب. أما المساحة الزائدة فیتتم قصها بشكل مربعات، لیسهل إزالتها لاحقاً بعد إنهاء تشکیل النموذج. وبعد الانتهاء من قص الطبقة الحالية تقوم أسطوانة التغذية بتوضیح شریحة جدیدة، لیتتم إصاقها ثم قصها بحيث تتخفض القاعدة الحاملة بمقدار السماكة عند تشکیل كل طبقة من الطبقات. كما تزود بعض الشركات آلاتها بجهاز قص ميكانيكي بدل جهاز المسح الليزري.

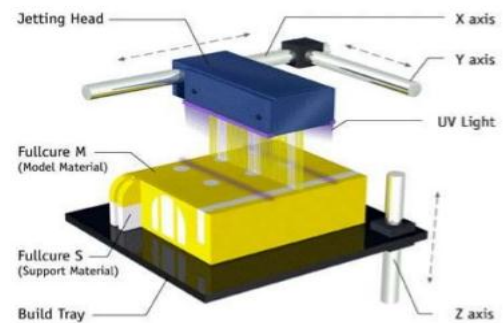
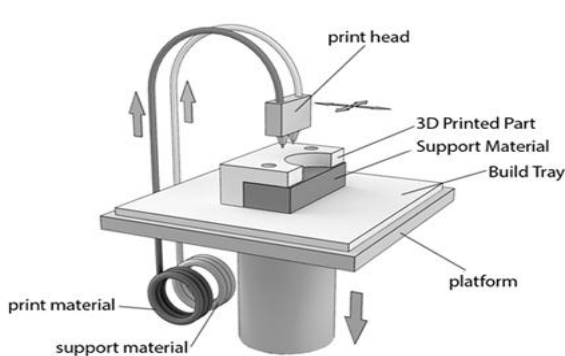
ویتم طلاء النموذج باللاكر (urethane lacquer) أو الإيبوكسي (epoxy resin)، لمنع النموذج من امتصاص الرطوبة خاصة عند استخدام شرائح الورق في بناء النموذج.



الشكل (8-1) نموذج مصنع بتقانة (LOM) [13].

#### 4.2.1. الطباعة النافثة للبوليمير الضوئي Photopolymer Phase Change Inkjets (PolyJet):

وتشبه هذه التقنية تقانة الطباعة المجسمة من حيث صناعة الأجزاء من بوليميرات متصلبة ضوئياً، إلا أنه وفي هذه الطريقة يقوم رأس نافث برش المواد البوليميرية الحساسة للضوء بشكل مشابه للطباعة النافثة التقليدية ومن ثم يتم تصلبها بوساطة مصدر للأشعة فوق البنفسجية، غالباً ما يكون مثبتاً على رأس النفث (JET HEAD) [14].



الشكل (9-1) طريقة عمل آلات الطباعة بتقانة (PolyJet) [14].

من ميزات هذه الطريقة إمكانية استخدام عدة ريزينات ملونة بألوان مختلفة ضمن الرأس النايف، وذلك للحصول على نموذج نهائي ملون حيث لا داعي لإجراء عمليات الطلاء.

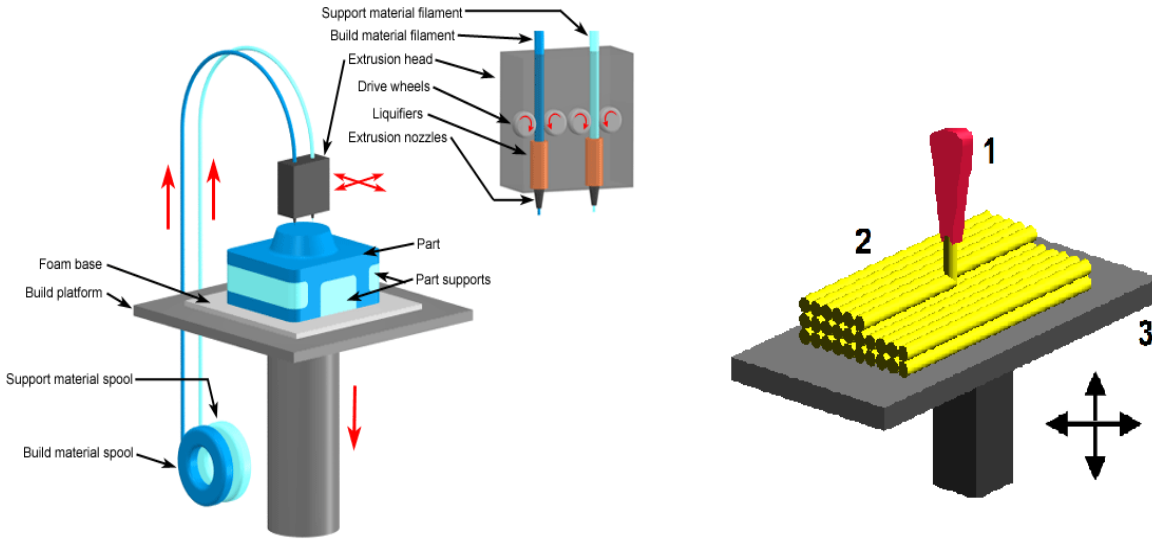
والميزة الثانية هي الدقة العالية للنموذج المصنع بهذه الطريقة، وتعد هذه الطريقة مناسبة للاستخدام في المكاتب نظراً لنظافة الآلة وانخفاض ضجيجها.

ومن الضروري الإشارة إلى أن المنتج النهائي يحتاج إلى إزالة المواد الداعمة التي غالباً ما تكون قابلة للذوبان في محلول خاص.

### **5.2.1. النمذجة بترسيب المصهور (FDM): Fused Deposition Modeling**

يتم في هذه الطريقة إنشاء طبقات النموذج من خلال بثق المادة على قاعدة متحركة في الاتجاهات الثلاثة بالنسبة لرأس البثق الحراري.

تكون المادة الأساسية على شكل سلك دقيق يدخل إلى الرأس الحراري بمساعدة بكرات خاصة ثم يصهر ضمن الرأس الحراري عن طريق رفع درجة حرارته فوق درجة الانصهار بدرجات عدة ويتم بثقه من الرأس الحراري، وما يليبث أن يتصلب ويلتصق بالطبقة السابقة، ويتم تكرار العملية حتى الانتهاء من النموذج.



الشكل (1-10) طريقة عمل آلات الطباعة بتقانة (FDM) [14].

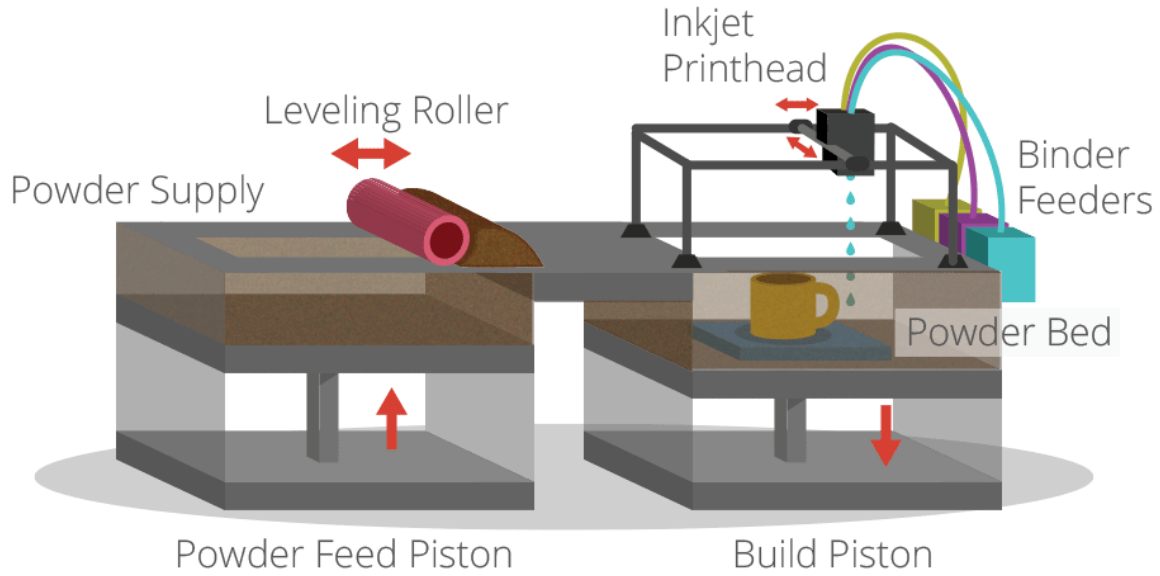
غالباً ما يتم استخدام رأسين حراريين، أحدهما لبتق المادة الأساسية، والآخر لبتق المادة الداعمة ويتم اختيار المادة الداعمة (Support Material) بحيث تكون سهلة الإزالة من دون إلحاق الضرر بالنموذج، وحالياً يتم استخدام مواد قابلة للذوبان في الماء. وغالباً ما تترك فجوات هوائية بين مسارات المادة الداعمة، لتسهيل عملية إزالتها.

تتميز آلات الـ (FDM) بانخفاض تكلفتها، وتكلفة المواد المستخدمة، مقارنة بالآلات الأخرى وتتمتع النماذج المصنعة بهذه التقنية بمتانة جيدة، ويمكن استخدام مجال واسع من المواد البوليميرية الحرارية (TP) أو حتى المواد المركبة التي تحتوي على البوليمير الحراري كمادة حاضنة. ومن أشهر المواد المستخدمة (ABS) والبولي كربونات (PC) التي تكون على شكل أسلاك ملفوفة على بكرات خاصة.

تحتاج هذه الطريقة إلى التحكم الدقيق في كل من درجة الحرارة، ومعدل التغذية بالمادة البوليميرية للحصول على أفضل جودة للسطح.

### 6.2.1. تقانة الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP): Three Dimensional Printing

تشبه هذه الطريقة طريقة تلييد المسحوق بالليزر (SLS) , ولكنها تختلف عنها في أن دمج المسحوق يكون من خلال رش مادة رابطة (Binder Material) بدل التلييد بالحرارة, وبالتالي تخفيض الطاقة اللازمة لتصنيع النموذج[15].



الشكل (1-11) طريقة عمل آلات الطباعة بتقانة (3DP) [15].

في البداية تقوم أسطوانة بتوزيع المسحوق فوق القاعدة المتحركة, وتعمل أيضاً على ضغط المسحوق بسماكة تعادل سماكة الطبقة المطلوبة ثم يتم رش المادة الرابطة في المناطق المراد ربطها من خلال رأس نافث, وذلك بشكل مشابه للطابعة النافثة للحبر. ثم تنخفض القاعدة ومعها النموذج بقدر سماكة الطبقة التالية وتقوم الأسطوانة من جديد بمد المسحوق , وضغطه, وتكرر العملية حتى بناء النموذج بالكامل. ولا نحتاج ضمن هذه التقانة إلى طبقات داعمة, لأن المسحوق غير المتصلب يقوم بهذه الوظيفة.

تتميز هذه الطريقة بالسرعة, وانخفاض تكلفة المواد المستخدمة, ويمكن عدها الأكثر سرعة.

ويمكن أيضاً بناء نماذج ملونة، ولكنها محدودة من حيث دقة الأبعاد وإنهاء السطح.

يمكن في بعض الأحيان استخدام الرمال بدل المسحوق، وذلك لبناء القوالب الرملية والأنوية (Cores) بشكل مباشر من دون الحاجة لتصنيع النموذج الأولي.

### 3.1. طباعة المواد المعدنية:

قامت مجموعة من الشركات بتطوير آلة التلبيد الانتقائي بالليزر ، لكي تقوم بتليد مواد معدنية إلا أن استخدامها بقي محدوداً بسبب الكلفة العالية للآلة، والمواد المستخدمة والتي تكون عبارة عن مسحوق للمعدن المطلوب. والسبب الرئيسي للتكلفة العالية هو ضرورة استخدام ليزر بطاقة عالية بحيث يصبح المسح الليزري أكثر تعقيداً ، ويحتاج إلى تقانات تبريد ، وتأثر المسحوق المعدني بالهواء المحيط.

وقد تم تطوير طريقة طباعة لا تحتاج لليزر ، فهي تعتمد على الشعاع الإلكتروني في صهر مسحوق المعدن ضمن غرفة مخلخلة من الهواء، وقد دعيّت تلك الطريقة بالصهر بالشعاع الإلكتروني (EBM) Electron Beam Melting، وتستخدم في إنتاج نماذج لخلائط كل من التيتانيوم والكوبالت والكروم، وذلك في مجال التطبيقات الطبية، وتطبيقات الفضاء.



الشكل (1-12) يوضح نماذج مصنوعة بتقانة (EBM) [16].

### 4.1. التطبيقات الرئيسية لآلات الطباعة ثلاثية الأبعاد:

1- في مجال إنتاج النماذج التوضيحية حيث يمكن استخدام نموذج شفاف, لتوضيح حركة السوائل أو بناء نماذج لتركيبات آلية معينة أو أي ابتكارات , وذلك بسرعة كبيرة من دون الحاجة للمرور بالطرق التقليدية.

2- تستخدم أيضاً لبناء نماذج تستخدم في اختبارات الأنفاق الهوائية وحتى بناء نماذج لأبنية ومنشآت بمقياس مصغر لتصبح عملية المعاينة أكثر واقعية. أو بناء عناصر الآلات بالقياس الحقيقي, والتأكد من ملائمة الأبعاد.

3- يتم استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد في صناعة نماذج السباكة , وبناء قوالب النوى المستخدمة في السباكة الرملية. أو بناء نماذج شمعية لتستخدم في عملية السباكة بالشمع المهدور. كما يمكن استخدام تقانة (3DP), لبناء القوالب الرملية بشكل مباشر أو بناء النوى الرملية بشكل مباشر بنفس الطريقة.

4- تستخدم في المجال الطبي لإنشاء التعويضات السنية المعدنية من مواد صعبة الإنصهار كخلاط التيتانيوم والكوبالت وذلك باستخدام تقانة (EBM).

5- تستخدم لإنجاز القوالب المعدنية المعقدة التي تستخدم في عمليات حقن البوليميرات, وتستخدم تقانة (SLS) لهذا الغرض.

## الفصل الثاني

### الدراسات المرجعية

#### 1.2. النمذجة السريعة (RP):

هي العملية التي ينتج فيها الجزء باستعمال طبقة ترسيب وهي تقانة ضرورية، إذ إنها تخفّض زمن التصنيع للمنتج حتى 30-50 %، وإن إذا كان الجزء النسبي معقداً جداً (1, 2)، تتألف دورة RP من تشكيل نموذج هندسي باستعمال برنامج SOLID وتحديد اتجاه الترسيب المناسب والتقطيع و توليد طرق لترسيب المواد والترسيب الجزئي ثم عمليات المعالجة[1].

تكون معظم الخطوات في RP آلية، يتم اختيار اتجاه الترسيب الجزئي بشكل يدوي بين بضعة خيارات موضحة من قبل برامج RP. إن اتجاه الترسيب الجزئي في برنامج ماكينة RP له تأثير مهم في العديد من الخواص التي تحدّد الجودة النهائية، وتكلفة النموذج (3).

اختيار اتجاه الترسيب الجزئي المثالي هو عامل مهم جداً حيث أنه يؤثر في زمن التصنيع، والبنية الداعمة، ودقة الأبعاد، والنهاية السطحية، وتكلفة النموذج.

يحدد عدد من العمليات البارامترات والقيود التي يجب أن نأخذها بالحسبان. فمن الصعب تحديد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي، وزمن المهمة، كما يجب المبادلة بين الخواص المتعاكسة المختلفة، مثل: النهاية السطحية، وزمن التصنيع.

هناك عدة محاولات (3-5, 7-13, 15, 16) لتحديد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي لخواص مختلفة مثل: الدقة، وزمن التصنيع، و البنية الداعمة ....

حدد العلماء دقة وتكلفة اتجاه الترسيب الجزئي، وتمّ زيادة الدقة السطحية من خلال تخفيض ارتفاع النموذج الوسطي. كما تمّ وضع تكلفة النماذج لـ (SL) و نمذجة الراسب المنصهر (FDM)، حيث تمّ تحديد تكلفة المكونات من أجل اتجاهات مختلفة، يحدد الاتجاه المناسب لأحد الخواص من لائحة الخطط الأساسية المعطاة مسبقاً[1].

طوّر العلماء نظاماً تفاعلياً لتحديد اتجاه الترسيب الجزئي المناسب. إذ يعدّ كلاً من النهاية السطحية، وزمن التصنيع، أو البنية الداعمة كخواص، وتمّ وضع التعليمات لتحديد الاتجاه المناسب[1].

قدم العلماء نظرة عن تحديد اتجاه الترسيب الجزئي المناسب مع الأخذ أن دقة الأبعاد وزمن التصنيع هما خاصتان، تمّ عدّه الدقة الجزئية كخاصة مؤقتة، وتمّ حسابها بالاعتماد على التجربة على أنواع مختلفة من السطوح، حيث إن الخواص الثانوية تقوم بتخفيض زمن التصنيع ، ويتمّ تحقيقها بتخفيض عدد الشرائح. وتمّ أيضاً إدخال الشرائح لها ارتفاع النتوء المحدد مسبقاً في عملها أيضاً، تمّ تمييز الخطوات الأساسية المحتملة بإيجاد السطوح المستوية للجسم حيث كانت بضعة اتجاهات تخضع لاعتبارات الدقة، ولاحقاً تمّ اختيار واحد أو اثنين من الاتجاهات بتخفيض زمن التصنيع[1].

حدّد العلماء لان اتجاه الترسيب الجزئي بالاعتماد على اعتبارات جودة السطح، وزمن التصنيع، أو تعقيد البنية الداعمة، حيث يتمّ تقدير جودة السطح إما بزيادة مساحة سطوح المناطق سيئة الجودة أو تخفيضها. تمّ تقدير زمن التصنيع بشكل مباشر بواسطة ارتفاع الجزء في اتجاه الترسيب، ويتمّ تقليص البنية الداعمة بتخفيض عدد النقاط المدعومة، ويتحدّد الاتجاه المناسب لهدف ما من لائحة الخطط الأساسية المختارة مسبقاً.

كما كان للعلماء نظرة مهمة عن الخطأ الحجمي، حيث وجد أن الاختلاف في حجم الجزء المعزول، وبرنامج كاد ينخفض لإيجاد الاتجاه المناسب. يحسب حجم الجزء الراسب بافتراض حواف الشريحة كما في المستطيل[1].

اقترح العلماء الاتجاه الأفضل الذي يعطي عدداً أقل من الشرائح بين بضعة اتجاهات مختارة مسبقاً.

طور العالم فام نظام لاتجاه نماذج كاد من أجل الترسيب الجزئي للحصول على أفضل مبادلة بين زمن التصنيع، والتكلفة، والدقة. الأداة هنا هي نظام أساسي مميز والتي تأخذ بالحسبان التكلفة، وزمن التصنيع، والميزات المعقدة، وميزات المنحى المثالية، والمساحات المحددة، وحجم الدعم للوصول إلى منحى التصنيع. والنظام هنا لديه ست وحدات، هي: وحدة التوجيه، ووحدة الدعم، ووحدة التوقيت، وحدة التكلفة، وحدة الميزات المعقدة، وحدة العرض. حيث يتمّ اختيار الاتجاهات المحتملة أولاً في وحدة التوجيه المعتمدة على السطوح الحرجة، الثقوب، القطوع، الأعمدة، النتوءات، المحاور. كما يتمّ الحصول على توصيات لاتجاه الترشيح المختار مسبقاً من أجل الترسيب الجزئي.

على أي حال قد يكون هناك اتجاه ترسيب جزئي أفضل من منحى الترشيح المختار مسبقاً.

طوّر العالم وست طريقة تخطيط للعملية من أجل تحسين الأداء عند التصنيع (أي زمن تصنيع أقل، دقة أفضل، ونهاية سطحية جيدة ، حيث يتمّ تخطيط العملية بواسطتهم بثلاث خطوات، وهي: وحدات التوجيهات، والتقطيع، ووحدات البارامتر[1].

إن كلاً من اتجاه الترسيب الجزئي، وسماكة الطبقة، وفترة التفتيش، والارتفاع  $Z$  ، ومعالجة كافية هي متغيرات العملية التي تمّ اتخاذها باستعمال البنية الداعمة وخطط كالقيود، حيث تمّ تطوير وحدة اتجاه الترسيب الجزئي بواسطتهم ، فهي تعمل على تقويم مجموعة الاتجاهات المعتمدة على السطوح الأسطوانية والمخروطية والمستوية في الجزء. يتمّ توجيه الجزء في هذه التوجيهات المختارة مسبقاً، ويتمّ تقطيعها بشكل متساوٍ، ليتمّ التبادل بين الأهداف الثلاثة السابقة. تمّ اختيار أكثر أربعة اتجاهات بديلة عملية من أجل التحقق في التقطيع ووحدات البارامتر للحصول على تخطيط العملية الأنسب في النهاية.

قدّم العالم XU طريقة تقطيع مشابهة لـ KULKARNI و DUTTA تقطع وحدات كاد الممثلة بالسطوح التحليلية. إن الاختلاف الأساسي بين المخططين أن XU يستعمل الخوارزميات الهندسية (GA) بينما Kulkarni و Dutta يستعملان برمجة خطية من الدرجة الثانية (SQP)، لإيجاد سماكة الطبقة عند  $Z(u,v)$  . كما أوجد XU أيضاً أن اتجاه الترسيب الأفضل لأجزاء SL بين الاتجاهات المختارة مسبقاً من أجل زمن التصنيع، الدقة، واستقرار الجزء. بالمبادلة بين قيم الدالة الموضوعية تمّ اختيار الاتجاه الأفضل.

كما طوّر العالم McClurkin نماذج لتوقع زمن التصنيع، والدقة، والنهاية السطحية لأجزاء SL باستعمال مبدأ رد فعل السطح، تمّ استعمال تقانة البرمجة لتحديد منحى الترسيب.

## 2.2. الدراسة الأولى: تهيئة بارامترات التسريع النموذجية لإنتاج جسم (ABS) المرن.

### Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object.

قام الباحثون (B.H. Lee, J. Abdullah, Z.A. Khan) عام (2005) [1] بإيجاد بارامترات العملية المثلى لتشكيل رواسب الانصهار (FDM) , وذلك باستخدام طريقة Tanguchi , و كانت أهم البارامترات المدروسة للعملية المثلى لتشكيل رواسب الانصهار (FDM) هي : سماكة الطبقة , والزاوية الخطية و العرض الخطي , و فتحة الهواء حيث تمت دراسة كل منها بثلاث مستويات كما يبين الجدول (1.2.2) و التي بدورها تؤثر بشكل ملحوظ في الأداء المرن لنموذج ABS المرن , بينما هناك بارامترات أخرى مثل: الرطوبة ودرجة الحرارة تبقى ثابتة . كما تم وضع المستويات المثالية للبارامترات عند زوايا مختلفة.

الجدول (1.2.2) بارامترات الترسيب ومستوياتها [1].

| Symbol | FDM parameter   | Unit          | Level 1    | Level 2  | Level 3     |
|--------|-----------------|---------------|------------|----------|-------------|
| A      | Air gap         | mm            | Solid fine | Sparse   | Double wide |
| B      | Raster angle    | Degree angles | 0°/90°     | 45°/-45° | 30°/60°     |
| C      | Raster width    | mm            | 0.305      | 0.655    | 0.980       |
| D      | Layer thickness | mm            | 0.178      | 0.254    | 0.305       |

وتم تشكيل المصفوفة العمودية التي تتضمن نسبة الإشارة الى الضوضاء (S/N) وفق ثمان درجات حرية , كما يبين الجدول (2.2.2) حيث تم استخدام تحليلات التباين (ANOVA) للتحقق من بارامترات العملية , لكي يتحقق الأداء المرن المثالي لنموذج ABS المرن.

الجدول (2.2.2) المستويات التجريبية باستخدام المصفوفة العمودية [1].

| Experiment number | Parameter/level |   |   |   |
|-------------------|-----------------|---|---|---|
|                   | A               | B | C | D |
| 1                 | 1               | 1 | 1 | 1 |
| 2                 | 1               | 2 | 2 | 2 |
| 3                 | 1               | 3 | 3 | 3 |
| 4                 | 2               | 1 | 2 | 3 |
| 5                 | 2               | 2 | 3 | 1 |
| 6                 | 2               | 3 | 1 | 2 |
| 7                 | 3               | 1 | 3 | 2 |
| 8                 | 3               | 2 | 1 | 3 |
| 9                 | 3               | 3 | 2 | 1 |

وتمّ إنتاج تسع عينات في ماكينة FDM 3000 باستعمال ABS طبقا للبارامترات وفق الجدول (3.2.2) وعند الزوايا 10, 15, 20 درجة. و حللت النتائج باستخدام التأثيرات الرئيسية ANOVA وتحليل النسبة (S/N) و قورنت النتائج التجريبية مع النتائج المرجعية .

الجدول (3.2.2) المتوسط بين المسافات وزوايا مختلفة للإزاحة[1].

| Experiment number | Throwing distance (cm) |        |        |
|-------------------|------------------------|--------|--------|
|                   | 10°                    | 15°    | 20°    |
| 1                 | 96.70                  | 160.13 | 250.17 |
| 2                 | 95.53                  | 165.50 | 256.00 |
| 3                 | 100.07                 | 164.10 | 253.77 |
| 4                 | 98.23                  | 157.20 | 234.13 |
| 5                 | 107.80                 | 185.87 | 304.80 |
| 6                 | 104.63                 | 179.97 | 275.53 |
| 7                 | 99.83                  | 171.20 | 275.27 |
| 8                 | 104.37                 | 169.90 | 263.37 |
| 9                 | 125.33                 | 213.83 | 325.43 |

و وجد أن الاختلاف بين النتائج المرجعية والنتائج التجريبية هو فقط 0.6 cm أي أن نسبة الخطأ فقط 0,18 %.

الجدول (4.2.2) مقارنة بين النتائج التجريبية والمرجعية[1].

|                        | Optimal condition                                                 |                                                                   | Difference |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------|
|                        | Estimation                                                        | Experiment                                                        |            |
| Level                  | A <sub>3</sub> , B <sub>3</sub> , C <sub>3</sub> , D <sub>1</sub> | A <sub>3</sub> , B <sub>3</sub> , C <sub>3</sub> , D <sub>1</sub> | –          |
| Distance achieved (cm) | 331.53                                                            | 330.93                                                            | 0.6        |
| S/N value              | –                                                                 | 50.39                                                             | –          |

و بناءً على النتائج التجريبية توصل الباحثون إلى ما يلي :

البارامترات المثالية ومستوياتها عند زوايا الإزاحة ( 10, 15, 20 ) هي : A3B3C2D1

A3B3C2D, A3B3C3D1, بالترتيب . و من أجل زاوية الإزاحة 10 : تعطي فتحة الهواء أداء

أعظمي للمنتج الناتج (مسافة القذف) . أما من أجل زاوية الإزاحة 15 : تعطي كل من الزاوية

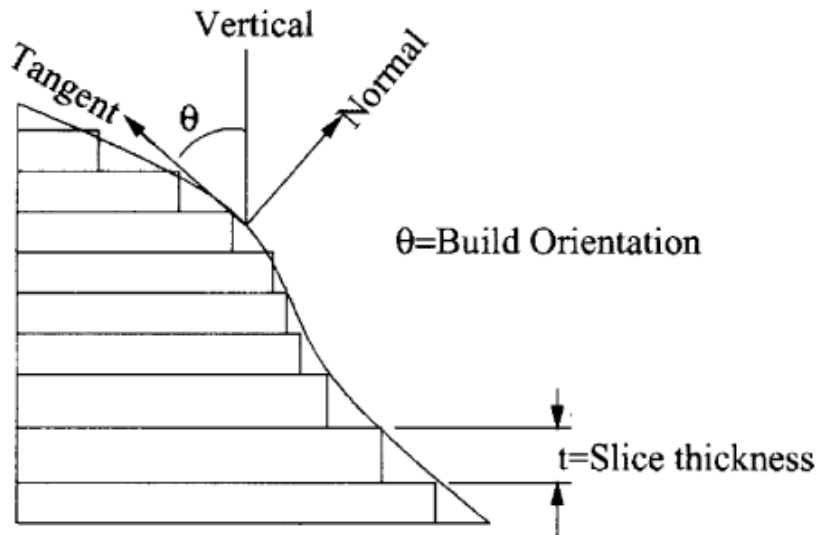
الخطية وسماكة الطبقة أداءً أعظماً متساوياً تقريباً للمنتج الناتج (مسافة القذف) ومن أجل زاوية الإزاحة 20 فإن سماكة الطبقة تعطي أداءً أعظماً للمنتج الناتج.

### 3.2. الدراسة الثانية. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. (2003).

قام الباحثون (K. Thrimurthulu a, Pulak M. Pandey b, N. Venkata Reddy) عام (2003) [2] بدراسة للحصول على اتجاه الترسيب الجزئي المثالي في عملية نمذجة الراسب المنصهر لتحسين الإنهاء السطحي الجزئي وتقليل زمن التصنيع, حيث أن الإنهاء السطحي , وزمن الترسيب الجزئي هما شيئان مهمان في النمذجة السريعة (RP) , و يكونان متعاكسين , وبالتالي يجب الوصول إلى حل وسطي بين هاتين السمتين اللتين تخصان النماذج في RP , ويمكن التوصل إلى حل وسطي بين هاتين السمتين باستعمال مخطط شرائحي تلاؤمي , ومنه يُستخلص إن اختيار اتجاه الترسيب الجزئي المناسب سيوفر حلاً أفضل .

وطور الباحثون خوارزمية ذات رموز حقيقية بالاعتماد على النماذج المستخدمة لتقويم متوسط خشونة السطح وزمن التصنيع و تساعد هذه الخوارزمية على الحصول على الحل المثالي الذي يتوافق مع النتائج السابقة.

تمّ تصنيع قطعة لدراسة القساوة أو الخشونة السطحية لسطح القطعة المعالج FDM باتجاهات تصنيع مختلف (الزاوية بين مماس السطح والاتجاه العمودي ) , كما هو مبين في الشكل (1.3.2) .



الشكل (1.3.2) الزاوية بين مماس السطح والاتجاه العمودي [2].

و تمّ استخدام النمذجة السريعة (RP) التي ينتج فيها النموذج باستعمال طبقة ترسيب تلو الطبقة من المادة وتمّ إعداد النموذج بواسطة ماكينة 1650 FDM – حيث كانت سماكة الشريحة 0,254 mm درجة حرارة الجزء الكيميائي المنصهر 270 c , و 70 c درجة حرارة الغلاف وفجوة الهواء تكون

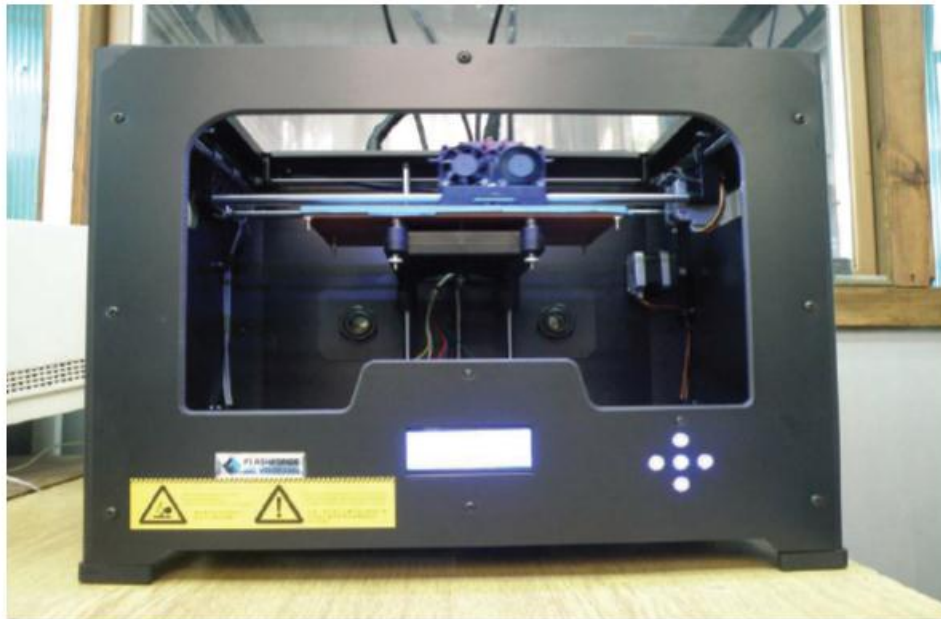
صفرًا، وتمّ قياس قيم القساوة أو الخشونة السطحية لسطوح مختلفة باستخدام مقياس السطوح 5000 . لوحظ أن هناك فتحة بين مسارات الترسيب إذا كانت اتجاهات التصنيع بين  $c$  70 و  $c$  90 ، في حين ليس هناك أي فتحة في المسارات ضمن مجالات التصنيع  $c$  0 - 70 .

وقد استطاع الباحثون تقديم منهجية واضحة لتحديد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي لعملية FDM، أي زمن التصنيع و متوسط القساوة أو الخشونة السطحية يتمّ تقليلهما بتقليل مجموع أوزانهما. و تمّ اخذ تأثير البنية الداعمة بالحسبان في تقويم المقدارين ، وهكذا يكون تحقيق الحد الأدنى للبنية الداعمة يكون ضمن هذه الدراسة.

كما تمّ استعمال التشريح التلاؤمي بشكل أني في تحديد اتجاه الترسيب الجزئي ، وتمّ التأكد من اعتبارات النظام المطور باستعمال النتائج السابقة. و منه فان المنهج المقترح يستخدم لتحديد اتجاه الترسيب الجزئي لأي جزء معقد مكون بشكل كامل . و تبين أن اختيار اتجاه الترسيب الجزئي المثالي هو عامل مهم جداً حيث أنه يؤثر على زمن التصنيع ، والبنية الداعمة ، ودقة الأبعاد ، الإنهاء السطحي ، وتكلفة النموذج .

## 4.2. الدراسة الثالثة : DIMENSIONAL ACCURACY OF PROTOTYPES MADE WITH FDM TECHNOLOGY

حيث قام الباحثون (Nikola Šimunić, Tihomir Mihalić, Ana Fudurić, Davor Tomić) بدراسة عنوانها الدقة البعدية للنماذج الأولية المصنعة وفق تقانة FDM (2017) [3]: الهدف من هذا البحث هو تحديد أي مادة يمكن أن تقدم نماذج أولية أكثر دقة من حيث الأبعاد بالاعتماد على تقانة الرواسب المنصهرة (FDM). في الإجراء التجريبي للدراسة تم استخدام مواد ستايرين أكريل نيتريل البوتادين (ABS) و حمض البولي لاكت الصمغي (PLA) كلا على حدا. و تم فحص دقة الأبعاد بمقارنة النموذج الناتج عن التصميم بمساعدة الكمبيوتر (CAD) مع كل نموذج من عشرة نماذج تم الحصول عليها بواسطة طريقة المسح الضوئي ثلاثي الأبعاد. و لهذا الغرض (أي طباعة النماذج وفق FDM) تم استخدام جهاز Forge Creator X Flash مع اثنين من الفوهات (اثنين من رؤساء الطارد). الجهاز له أبعاد صغيرة نسبياً، ويمكن استخدام هذا النوع كمعدات مكتبية الشكل (1.4.2).

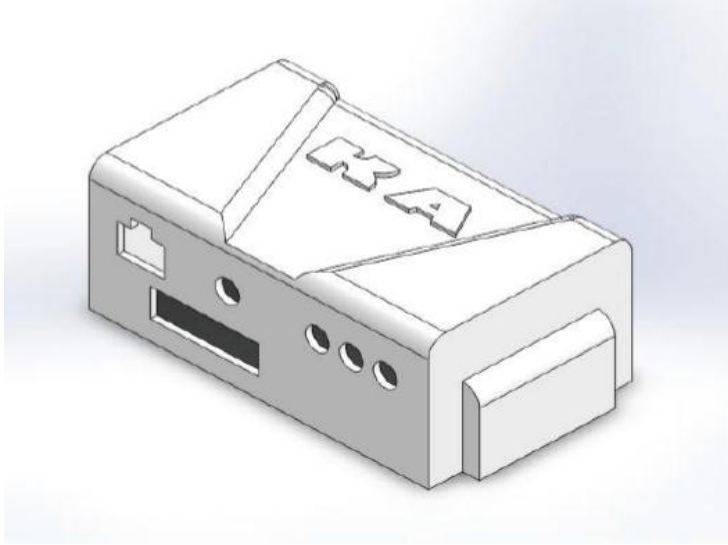


الشكل (1.4.2) جهاز Forge Creator X Flash [3].

ووفقا لهذه الدراسة فإن الإجراء التجريبي قد مر بالمراحل التالية:

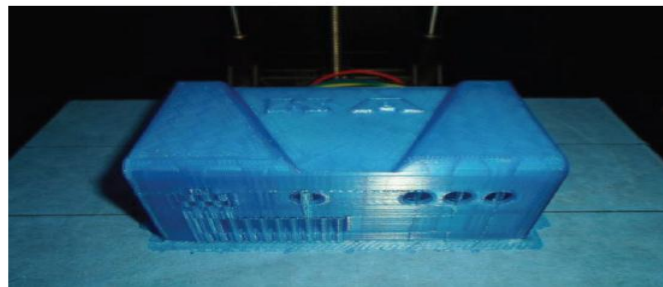
كانت الخطوة الأولى هي إنشاء النموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام Solid Works 2014 (الشكل (2.4.2)). يمثل سمك الجدار الذي يبلغ 2 مم فقط و هذه مشكلة رئيسية عند التصنيع على جهاز

FDM لسطح المكتب. حيث إن النماذج الأولية ذات الجدران الرفيعة والعالية المصنوعة على هذا الجهاز لا تكون ثابتة الأبعاد كما هو الحال بالنسبة للأجهزة الصناعية، كما أنه عادة تحدث الإجهادات و الالتواءات بالأبعاد بسبب الاختلافات في درجة الحرارة بين منصة العمل و المشغولة. وفي مرحلة التشغيل. كان ABS أكثر ميلا إلى الانزياح أو التشقق بعيداً عن منصة العمل. أما بالنسبة ( PLA )، كانت هناك صعوبات في انسداد الباثق.



الشكل (2.4.2) الموديل ثلاثي الأبعاد [3].

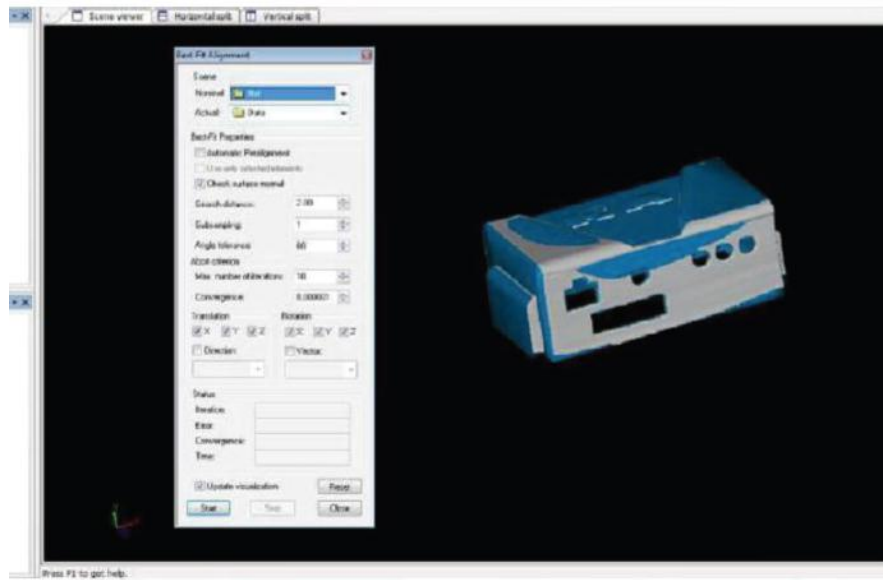
وبعد تصميم النموذج ثلاثي الأبعاد الافتراضي ، وتم تحويله إلى تنسيق ملف STL، وتصنيعه مع جهاز FDM، وطُبعت عشرة نماذج: خمسة في ABS (غلاف خارجي أبيض) ، وخمسة PLA (غلاف خارجي أزرق). أبعاد 100 × 60 × 41 ملم (L × W × H) مع سمك الجدار 2 مم، وتم إجراء جميع النماذج الأولية في حيز مغلق بحيث كانت التأثيرات الخارجية ضئيلة (الشكل (3.4.2)) يبين أحد هذه النماذج.



الشكل (3.4.2) النموذج النهائي بمواد PLA [3].

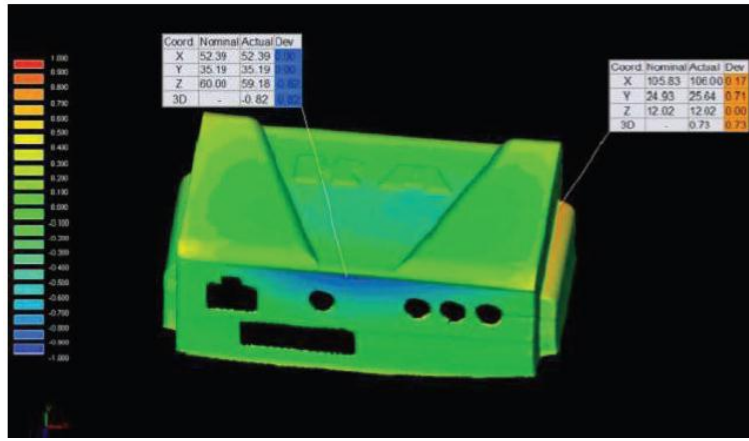
و بعد ذلك تمّت عملية التحويل (المسح الثلاثي الأبعاد) لكل من النماذج على ماسح ضوئي 3D صناعي.

ليتمّ بعدها مقارنة الأبعاد بين تصميم الحاسوبي (CAD) ونموذج 3D الرقمي، وذلك من خلال استخدام برنامج (INSPECT plus) الذي يتيح للمستخدمين بمحاذاة بيانات المسح الضوئي مع بيانات المسح الضوئي الأخرى أو نماذج CAD ثلاثية الأبعاد. ويبين الشكل (4.4.2) عملية المطابقة بين أبعاد النموذجين حيث يظهر المجسم المصنّف cad و المجسم الناتج عن عملية المسح الضوئي الرقمي.



الشكل (4.4.2) المطابقة بين نموذج cad ونموذج المسح الضوئي الرقمي [3].

الخطوة التالية هي التحقق من قيم الانحراف ، وتتمثل في تضمين تمثيل ما يسمى "جدول اللون" الذي يستخدم ألواناً مختلفة لوضع علامة على الانحرافات في النموذج الذي يتمّ التحقق منه. فكما يبين الشكل (5.4.2) مثلاً يحدد اللون الأحمر الانحرافات في الاتجاه الإيجابي (سطح النموذج يقع خارج حدود مجسم CAD) والأزرق في الاتجاه السلبي (سطح النموذج يقع داخل حدود مجسم CAD).



الشكل (5.4.2) تقسيم الأبعاد في النموذج "ABS 2" [3].

وبين الجدول (1.4.2) التالي قيم الانحرافات عن مجسم CAD لكل من نماذج ABS الخمسة و كذلك الحال بالنسبة PLA بالإضافة إلى رمز الوجه المعني بالانحراف، حيث نجد من هذه القيم أن متوسط الانحراف الإجمالي ABS هو  $0.13 \pm 0.79$  و  $-0.734 \pm 0.06$ . وانحراف النماذج الأولية (PLA) هو  $0.06 \pm 0.28$  و  $-0.03 \pm 0.54$ . وهذا يعني أن انزياح نماذج (PLA) عن الـ CAD كانت أقل من ABS.

الجدول التالي (1.4.2) يبين قيم الانحرافات عن مجسم CAD [3].

| PROTOTYPE | MAX. POSITIVE DEVIATION (mm) | FACE | MAX. NEGATIVE DEVIATION (mm) | FACE |
|-----------|------------------------------|------|------------------------------|------|
| ABS 1     | 0.70                         | RF   | - 0.75                       | FF   |
| ABS 2     | 0.73                         | RF   | - 0.82                       | FF   |
| ABS 3     | 1.01                         | TF   | - 0.67                       | BF   |
| ABS 4     | 0.79                         | TF   | - 0.73                       | FF   |
| ABS 5     | 0.70                         | RF   | - 0.70                       | FF   |
| ABSAVG    | $0.79 \pm 0.13$              |      | $- 0.73 \pm 0.06$            |      |
| PLA 1     | 0.26                         | RF   | - 0.59                       | BF   |
| PLA 2     | 0.24                         | TF   | - 0.52                       | BF   |
| PLA 3     | 0.26                         | RF   | - 0.54                       | BF   |
| PLA 4     | 0.24                         | LF   | - 0.53                       | BF   |
| PLA 5     | 0.39                         | LF   | - 0.52                       | FF   |
| PLAAVG    | $0.28 \pm 0.06$              |      | $- 0.54 \pm 0.03$            |      |

ونجد من هذه القيم أن متوسط الانحراف الإجمالي . ABS هو  $0.13 \pm 0.79$  و  $-0.734 \pm 0.06$ . وانحراف النماذج الأولية (PLA) هو  $0.06 \pm 0.28$  و  $-0.54 \pm 0.03$ . وهذا يعني أن انزياح نماذج (PLA) عن CAD كانت أقل من ABS.

و في النهاية نجد أن هذه الدراسة قدمت منهجية واضحة لتحديد أي مادة يمكن أن تقدم نماذج أولية أكثر دقة من حيث الأبعاد بالاعتماد على تقانة الرواسب المنصهرة (FDM). و بعد عملية المقارنة الحاسوبية لأبعاد الناتجة بين كلا من النماذج المطبوعة بعد إجراء المسح الضوئي لها من جهة و بين مجسم CAD من جهة أخرى و تحديد مقدار الإزاحات الحاصلة تبين أن النماذج المصنعة بمادة (PLA) كانت أكثر دقة و ثباتية للأبعاد من تلك المصنوعة من ABS.

## 5.2. الدراسة الرابعة : RESEARCH ON THE WARPING DEFORMATION IN FUSED DEPOSITION MODELING.

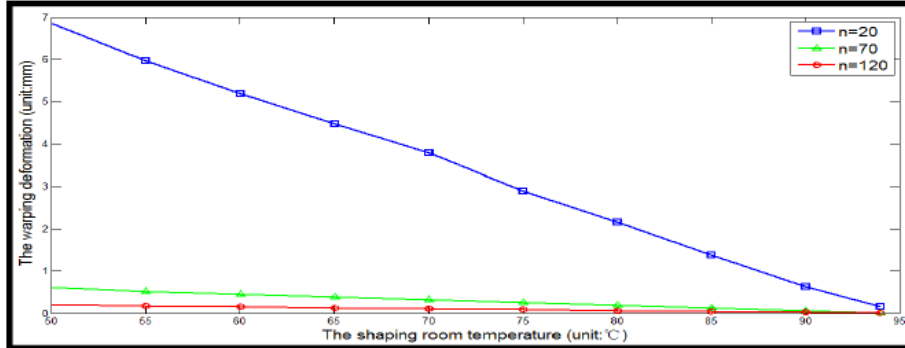
حيث قام الباحثون (Xin Li, Zhuo Wang, Jianzhong Shang) بدراسة بعنوان البحث انزياح الانسياب اللدن في عملية تموضع المادة المنصهرة (2016) [4]: حيث ركزت على مشكلة انزياح عملية الانسياب اللدن في عملية تشكيل الراسب المنصهر FDM ، وحللت مصدره (الانزياح) وآلية عمله. و قامت بتأسيس النموذج الرياضي له والذي تمّ بناءا على ثلاث فرضيات من خلال تحليل عملية اعداد النماذج من FDM ، و درجة تأثير بارامترات هذه العملية ، بما في ذلك عدد الطبقات ، وطول المقطع ، ودرجة حرارة غرفة التشكيل ، ومعامل تقلص الخط مادة الطباعة بشكل شامل و بينت نتائج تحليل هذه الظاهرة في طباعة بتقانة FDM و التي تستخدم على نطاق واسع في التصنيع و الطباعة السريعة.

ان انزياح عملية الانسياب اللدن هو السبب الرئيسي لسوء جودة النماذج الأولية. ويعتبر تحسين جودة النماذج الأولية من أكثر القضايا إلحاحًا والتي يجب معالجتها في الطباعة السريعة للنماذج .

و تمّت دراسة هذه المشكلة وفق عدة فرضيات اولها درجة تأثير برامترات الطباعة على الانزياح الحاصل و إنشاء النموذج الرياضي لانزياح عملية الانسياب اللدن ، وتحليل انزياح عملية الانسياب من اربع نواحي بما في ذلك عدد الطبقات ، وطول المقطع ، ودرجة حرارة غرفة التشكيل ، ومعامل انكماش الخط (خط الطباعة).

إن استراتيجية تخفيف انزياح عملية الانسياب اللدن وفق تقانة FDM مرت بعدة مراحل اهمها:

تشوه النموذج الأولي وتقليل إلى حد ما يتعلق بمعامل المرونة لمعظم المواد كالبلاستيك الحراري ، حيث يكون حساس لدرجة الحرارة. وبالتالي ، فإن رفع درجة حرارة غرفة التشكيل لخفض الإجهاد الداخلي يمكن أن يساعد في الحد من انزياح عملية الانسياب اللدن . كما في الشكل(1.5.2)



الشكل(1.2.5) تأثير حرارة الحجرة على الانسياب اللدن[4].

ومن الشكل رقم(2.5.2) والشكل رقم (3.5.2) ، يمكن ملاحظة أن أبعاد النماذج الأولية عامل مؤثر مهم ، وكلما كان البعد أكبر ، كلما كان التشوه او الانزياح أكبر. وبالتالي ، تجنب النماذج الطويلة الرقيقة إلى أقصى حد ممكن هو وسيلة للحد من انزياح عملية الانسياب اللدن.

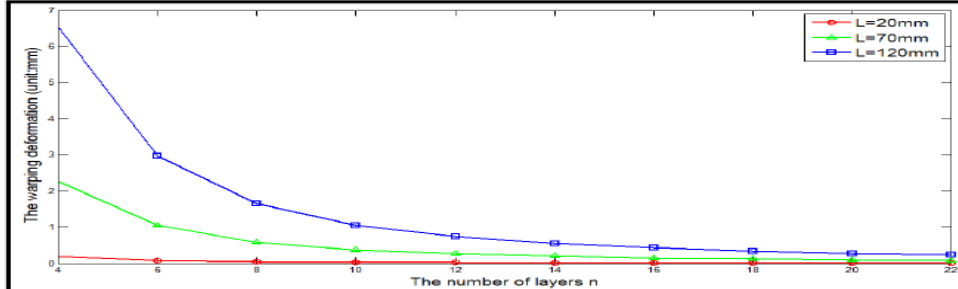


Figure No.5: The influence of number of layers n on the warping deformation

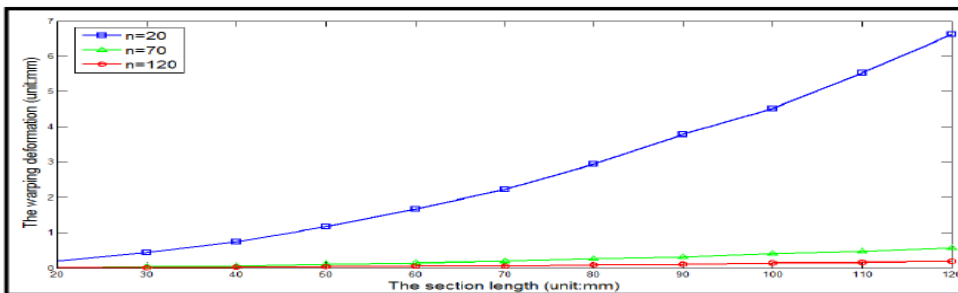
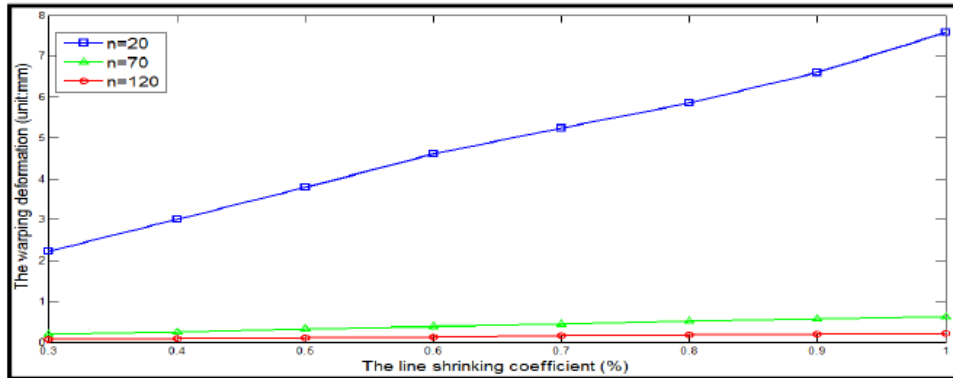


Figure No.6: The influence of section length L on the warping deformation

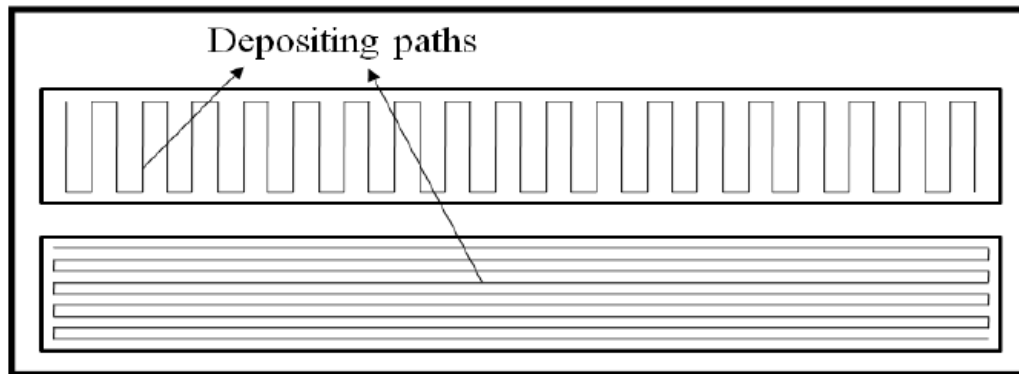
الشكل(2.5.2) تأثير عدد الطبقات في الانسياب اللدن و الشكل(3.5.2) تأثير طول المقطع في عملية الانسياب اللدن[4].

و من الشكل (4.5.2) نلاحظ ازدياد الانزياح لانسياب المادة يزداد بزيادة معدل تقلص خط مادة الطباعة و بالتالي لتخفيف من الانزياح يجب استخدام مواد ذات معدل انكماش منخفض.



الشكل(4.5.2) تأثير معامل الانكماش في الانسياب اللدن[4].

ومن الشكل (5.5.2)، يمكن ملاحظة أن التشوه يزداد مع زيادة طول المقطع ، وفي عملية تثبيت جزأين من لوح رفيع واحد ، يكون تشوه الجزء الذي تكون مسارات تثبيته على جانبه الطويل أكبر بكثير من الجزء الآخر. وبالتالي للحد من انزياح عملية الانسياب ، يمكننا تقسيم الأجزاء إلى عدة قطع نحيلة ، ونجعل مسار التثبيت على جانبها القصير.



الشكل(5.5.2) تأثير زيادة الطول على الانسياب اللدن[4].

ويبين الشكل(6.5.2) نموذج نوع (ABS P400) بمعدل انكماش 4 بالمئة وفقا للمادة المشغلة وحرارة غرفة التشكيل 65°C والشكل (7.5.2) يبين شكل النموذج الناتج وفق هذه الدراسة.

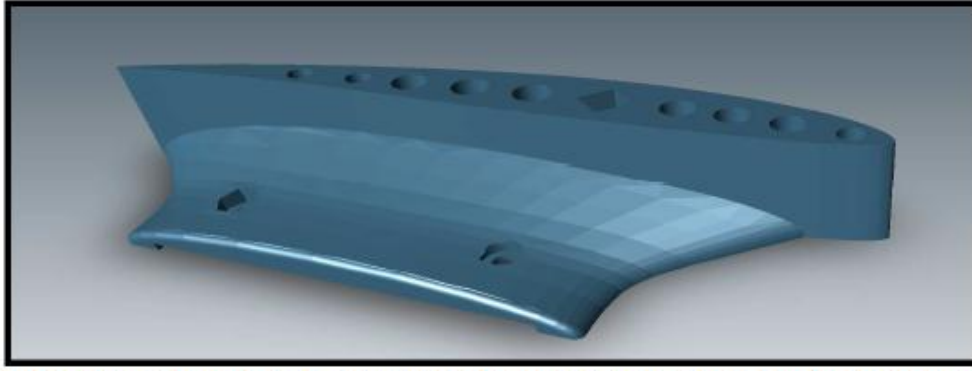


Figure No.10: The stl model of a 108mm×40mm×29mm wing-center-link part of UAV



Figure No.11: The manufactured wing-center-link part by Flash forge FDM printer

الشكل (6.5.2) والشكل (7.5.2) تأثير عملية الانسياب اللدن على النماذج المصنعة [4].

و قد تبين من هذه الدراسة أن انزياح عملية الانسياب اللدن هي من أهم العوامل المؤثرة على جودة الطباعة في عملية تشكيل الراسب المنصهر FDM, و أن اسباب هذه الظاهرة لا تعود فقط لخصائص المواد ومعاملات طباعات FDM ، ولكن أيضا البنية الهندسية للأجزاء وجهات تموضعها. كما وضعت هذه الدراسة استراتيجية لتخفيف انزياح عملية الانسياب اللدن تتمثل في مواد الطباعة من جهة و في تقانة اعداد النماذج من جهة اخرى, وهذا يشكل مرجعية مهمة لحل مثل هذه المشكلة عند الطباعة بطريقة FDM .

كما أن هذا البحث قام بتأسيس نموذج تحليلي نظري بواسطة فرضيات معقولة ، و دراسة درجة تأثير عدة عوامل مختلفة, بالإضافة لإنشاء نموذج رياضي لانزياح الانسياب اللدن ، والذي يمكن أن يوفر المراجع النظرية لتقانة FDM بالإضافة إلى تقنيات RP الأخرى.

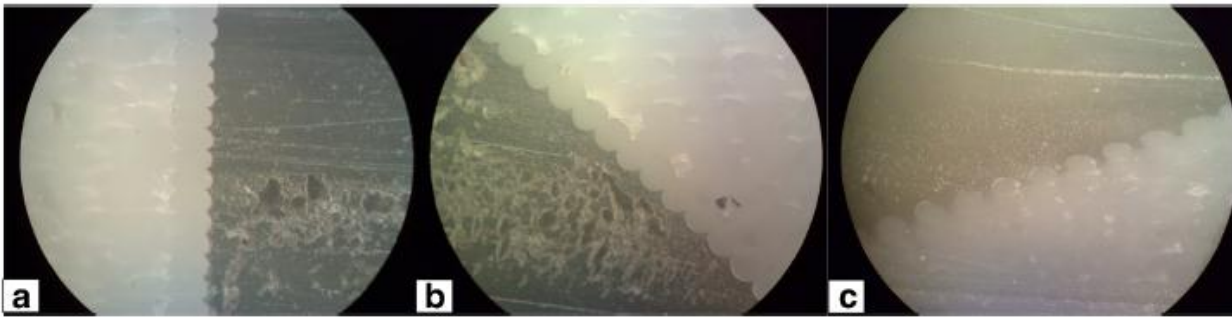
## 6.2. الدراسة الخامسة: Accuracy prediction in fused deposition modeling.

حيث قام الباحثون (A. Boschetto, L. Bottini) بدراسة بعنوان التنبؤ بدقة الأبعاد في التشكيل بتقانة الراسب المنصهر (2014): [5] ونظراً لكون تقانة FDM من أهم التقنيات المستخدمة في الطباعة نظراً لسرعتها و بساطتها و قدرتها على تقليل تكاليف الإنتاج بشكل كبير, الى أن ما يمنع انتشارها هي الدقة التي يمكن الحصول عليها, لذلك فإن في هذه الورقة , تم تطوير نموذج هندسي لشريط شعيرات المادة المنصهرة , يعتمد على زاوية الترسيب وسمك الطبقة , من أجل التنبؤ بأبعاد الجزء الذي يمكن الحصول عليه. وتم التحقق من صحة النموذج من خلال حملة تجريبية. وقد تم دراسة العينات عن طريق تحليل الوعورة السطحية من أجل دراسة الجوانب الهندسية الصغيرة و الكبيرة. وقد أبرزت هذه الدراسة موثوقية النموذج, كما تهدف الى تبيان التأثير المباشر لهذا العمل وهو القدرة على تخطيط العملية والمعرفة مسبقاً إذا كانت أبعاد جزء FDM ستلبي المواصفات التصميمية المطلوبة ام لا بإضافة إلى ضمان الاداء الوظيفي للجزء او النموذج المصنع. علاوة على ذلك , يمكن استخدام هذا النموذج لاختيار استراتيجية التصنيع المناسبة من أجل الامتثال للقيود الصناعية وحدودها.

### الإجراء التجريبي للدراسة:

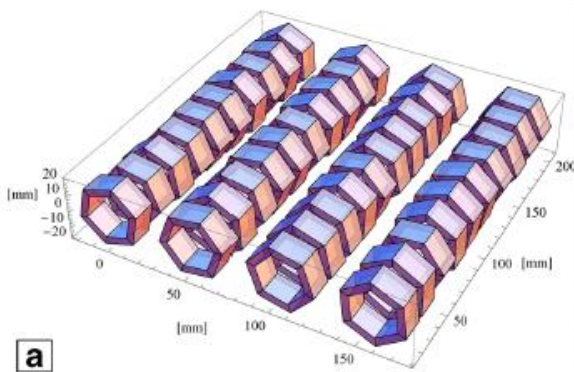
تم إعداد العينات عن طريق التثبيت , التقسيم , واللف: ثم تثبيتها براتنجات اليبوكسي , ثم تم تجزئتها بواسطة آلة القطع الدقيق للمعادن , وأخيراً لصقها باستخدام ورق الجليخ. والحصول على ثلاث حالات عند زوايا ترسيب مختلفة الشكل (a)(1.5.2) (زاوية 90) , من الواضح فإن حزمة الشعيرات المنصهرة مقيدة بالمادة المحيطة , وبالتالي , يتم تكديس الحزم على بعضها البعض , وبالتالي تقليل المشاكل التي تنشأ عن عدم محاذاة الحزم المترسبة . وبإجراء قياسات الأبعاد , يمكن تحقيق توافق جيد مع القيمة الاسمية.

في الشكل (b) (1.5.2) (زاوية 45) , تكون النسبة بين سطح حزمة الشعيرات المعرض للهواء والسطح الكلي حوالي 40% , أكبر من حالة a (27%): هذا يشير إلى معدلات تبريد مختلفة مما يؤدي إلى الانكماش وبالتالي تغير الأبعاد التي يمكن الحصول عليها. في الشكل (c)(1.5.2) (زاوية ترسيب 22.5) تكون النسبة 55% , مما يعطي انحراف أكبر للأبعاد.



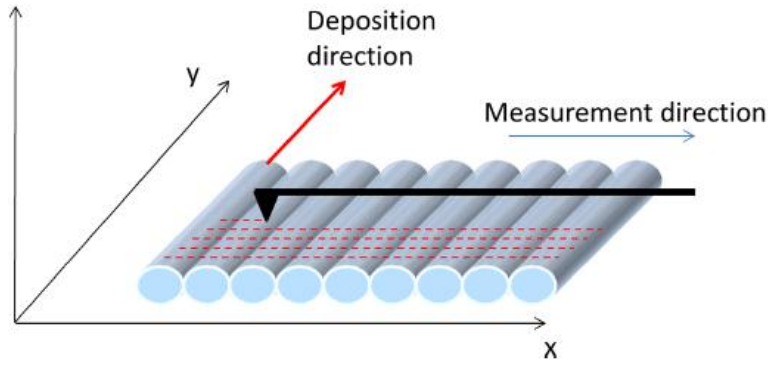
الشكل (1.5.2) ثلاث حالات FDM عند زوايا ترسيب مختلفة [5].

في المرحلة الثانية تم وضع الشكل التصميمي لمجموعة كاملة من العينات التي تم تدويرها عشوائياً (الشكل (b) (2.5.2)) ونقلها إلى الآلات التصنيع Stratasys Dimension Bst 768. باستخدام مادة أكريلوني تريل بوتادين ستايرين (ABS) عند درجة حرارة ترسب 270 درجة مئوية مع درجة حرارة الغرفة 75 درجة مئوية. الشكل (a) (2.5.2) يبين العينات الناتجة بعد التصنيع.

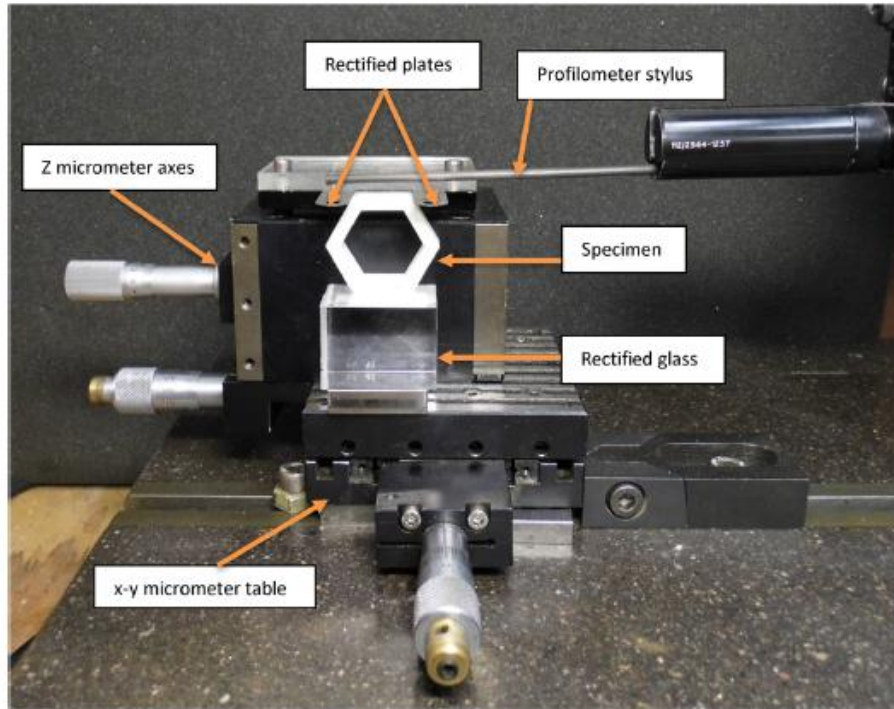


الشكل (2.5.2) يبين العينات الناتجة بعد التصنيع عند درجة حرارة ترسب 270 درجة مئوية [5].

كما تم تنفيذ القياس باستخدام مقياس التعرج السطحي باتجاه عمودي حيث حققت 4000 نقطة. وفق 13 قياس ، متباعدة عن بعضها بمقدار 1 مم ، بكمية إجمالية قدرها 52000 نقطة ، كما هو موضح في الشكل (3.5.2). ولكن من أهم مشاكل هذا المقياس هو عدم وجود خط مرجعي. وللتغلب على هذه المشكلة ، تم بناء النظام المذكور في الشكل (4.5.2). حيث تم استخدام منصتين ميكرومترين: على محاور x-y لتحريك الجزء تحت قلم مقياس التنبيه والمحور z لتحديد مجال التحسس ضمن سطرين مرجعيين عند ارتفاع معين. وتم وضع العينة على زجاج مصحح للمسافة ، على طول محاور . z



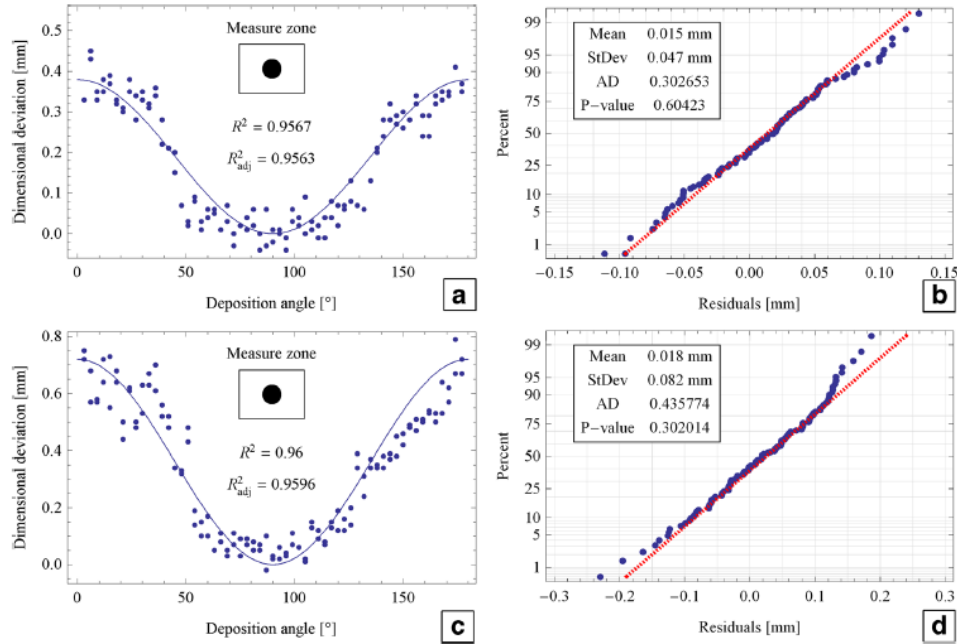
الشكل (3.5.2) القياس باستخدام مقياس التعرج السطحي باتجاه عمودي



الشكل (4.5.2) استخدام منصتين ميكرومترين: على محاور x-y [5].

أما في الشكل (2.5.2) ، تتم مقارنة النماذج والانحرافات التجريبية من القيم الاسمية للقياسات في مركز الوجه. في الشكل (a) (2.5.2)، من أجل سمك طبقة 0.254 مم ، نجد اختلاف زاوية الترسيب مع تناثر حوالي  $\pm 0.05$  مم وتؤكد البيانات التجريبية بأن الانحراف البعدي عند زاوية ترسيب 90 درجة هو صفر تقريباً ؛ و تبدأ قيمة هذا الانحراف بالارتفاع مع تغير الزاوية سواء بالازدياد أو النقصان. كما نلاحظ تقارب قيم الـ R-squared التنبؤية و التجريبية. كذلك الحال بالنسبة للشكل (c) (5.5.2) عند سماكة طبقة 0.331 mm نلاحظ ايضاً ازدياد قيم الانحرافات البعدية كلما تغيرت زاوية الترسيب عن الـ 90 درجة الا اننا نلاحظ تبعثر اكبر لهذه القيم عند زوايا المختلفة (50 درجة

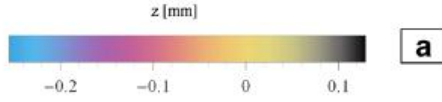
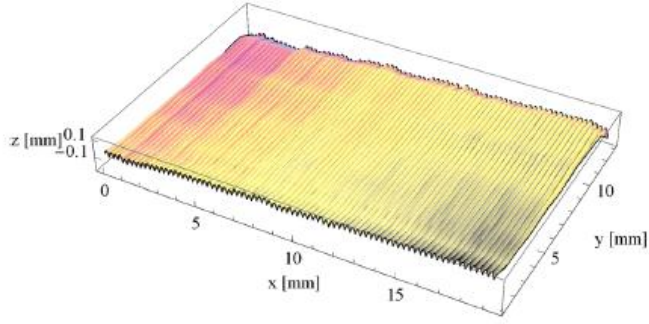
مثلا) بشكل أكبر من الحالة السابقة. كما نلاحظ من الشكلين (d)(5.5.2) (b)(5.5.2) التّموضع الخطي لنسب هذه الانحرافات في اتجاه الزيادة او النقصان عن القيم الطبيعية.



الشكل (5.5.2) comparison between model and experimental dimensional deviations as a function of the deposition angel for layer thickness 0,254 mm (a) and 0.331 mm (c) and respective probability plots (b,d)

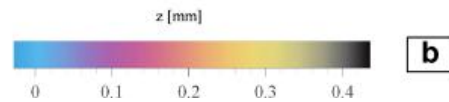
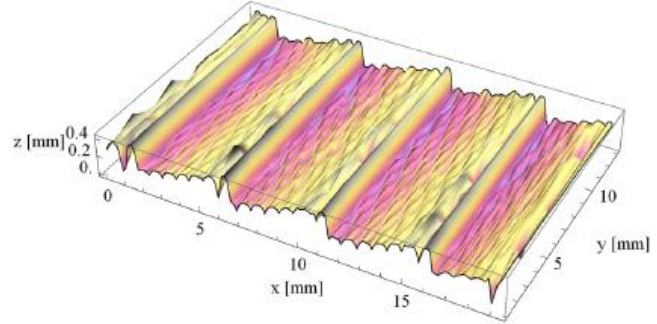
و يبين الشكل (6.7.2) الخريطة الثلاثية الناتجة عن مقياس الانزياح السطحي للعينات المنتجة و يتضح من الشكل (a)(6.7.2) مقدار الانزياح للعينات المنتجة عند زاوية ترسيب 90 حيث نلاحظ ان عرض الطبقة السطحية يساوي تقريبا سماكة الطبقة كما نلاحظ تمّوج خفيف مع ميلان سطحي يتراوح بين 0.1- إلى 0.1 . فيما نلاحظ اختلاف التدرج السطحي للعينات المقاسة عند زوايا ترسيب و سماكات مختلفة للطبقات كما في الاشكال b,c,d,e,f المبينة بالشكل (6.5.2).

$\alpha = 90^\circ$  L = 254 mm Top



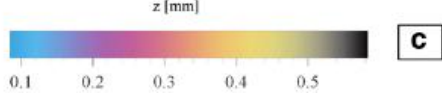
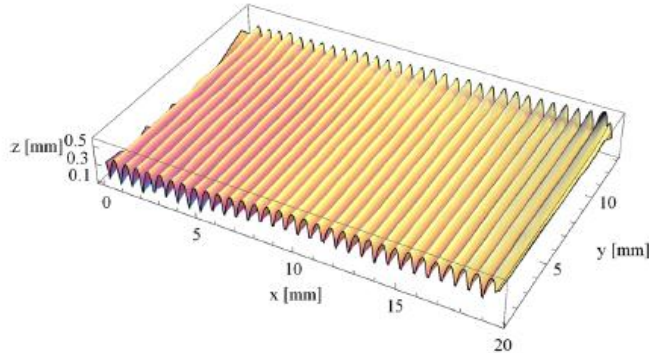
**a**

$\alpha = 3^\circ$  L = 254 mm Top



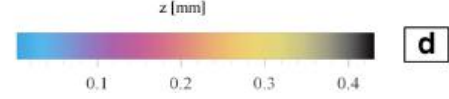
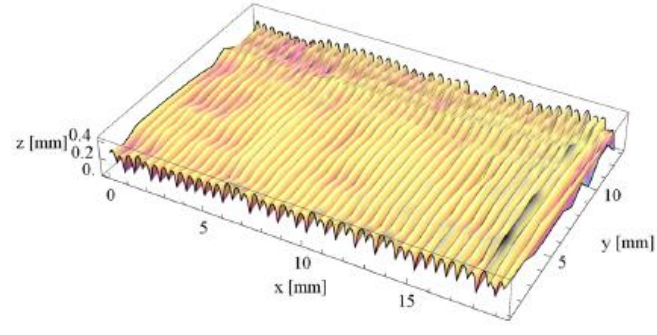
**b**

$\alpha = 24^\circ$  L = 254 mm Top



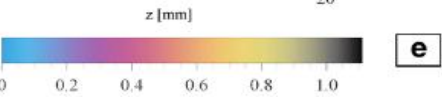
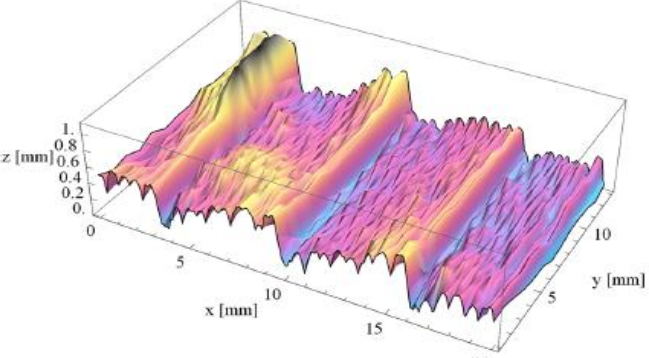
**c**

$\alpha = 147^\circ$  L = 254 mm Top



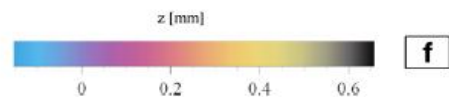
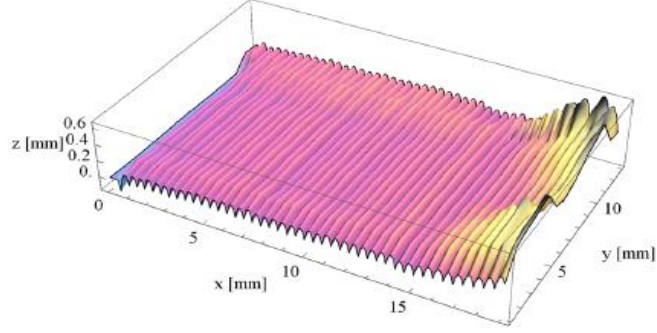
**d**

$\alpha = 3^\circ$  L = 331 mm Bottom



**e**

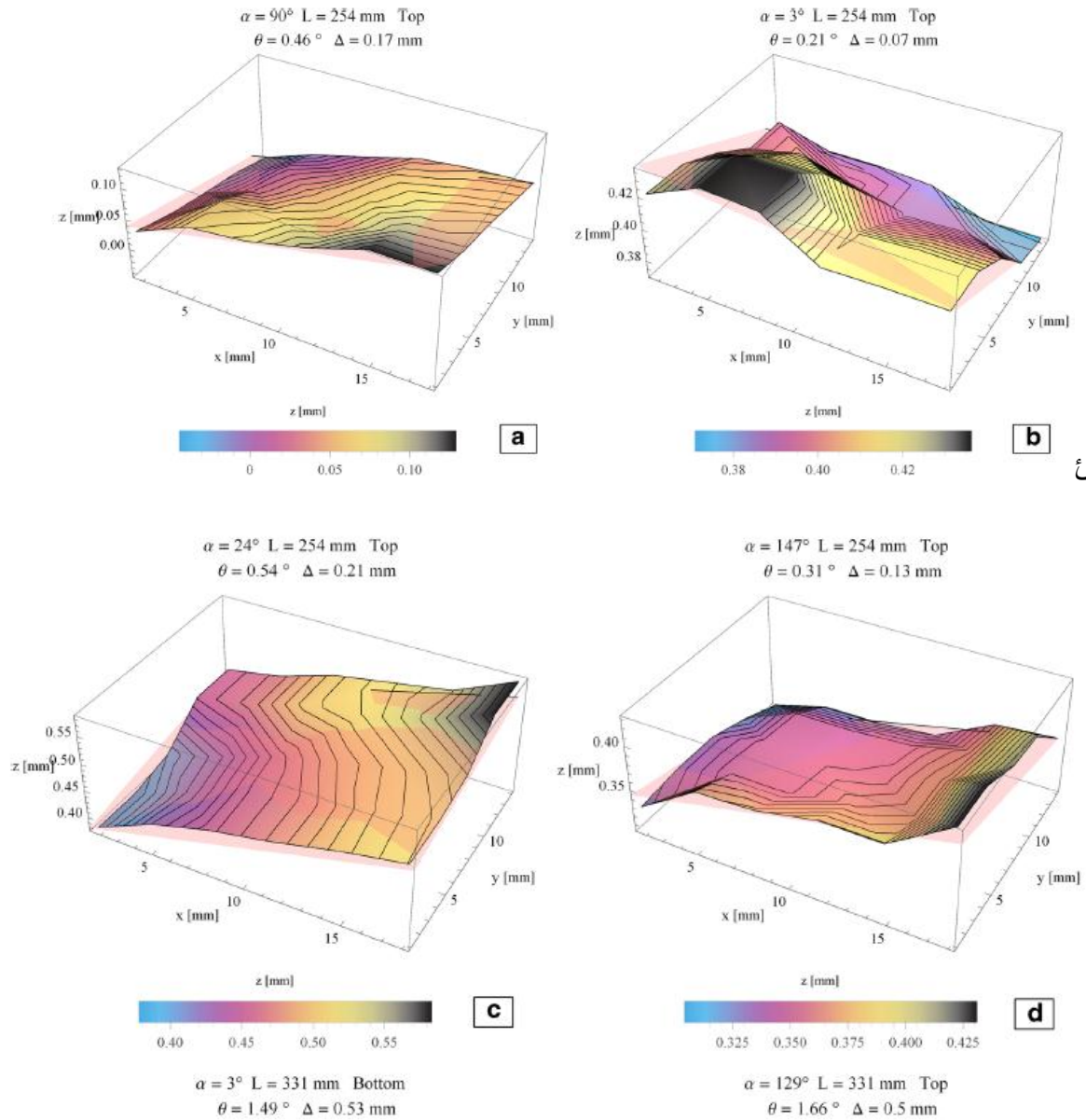
$\alpha = 129^\circ$  L = 331 mm Top

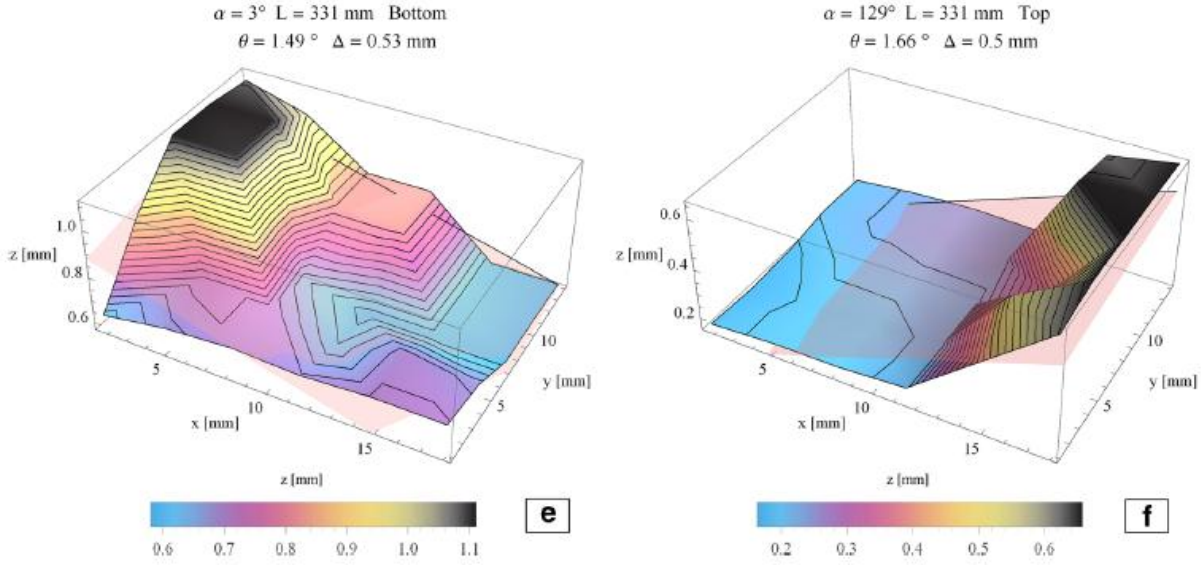


**f**

الشكل (6.5.2) الخريطة الثلاثية الناتجة عن مقياس الانزياح السطحي للعينات المنتجة [5].

في حين أن الشكل (7.5.2) يعرض ذات النقاط لذات السطح التي تم تمثيلها بالشكل (7.5.2) حيث أن هذه الخرائط تسمح بمحاكاة القياسات الميكرومترية المثالية لهذه النقاط في عدة مناطق لذات السطح ومن أجل تحديد تأثير التواء السطح على دقة جزء الأبعاد ، تم حساب أقصى ارتفاع للانحراف  $\Delta$  والزاوية  $\theta$  بين المستوي المنحني والمستوي الأفقي. في الشكل a8، يتم تثبيت مستوى الانحدار إلى الحد الأقصى للنقاط التي تم العثور عليها، ونجد أن المستوى السطحي يميل بمقدار  $\theta = 0.46^\circ$  درجة والانحراف العمودي يكون  $\Delta = 0.17$  مم و بالتالي فإنه يتبين أن زاوية الترسيب العامودية تعطي دقة أفضل للسطوح في حين نجدها اقل في باقي الحالات كما يتبين في الشكل (7.5.2) (b,c,d,e,f)، حيث تختلف دقة السطوح باختلاف الانحراف الافقي و العامودي عند زوايا ترسيب و سماكات مختلفة للطبقات.





الشكل ( 7.5.2 ) النقاط لذات السطح التي تم تمثيلها بالشكل (6.7.2) حيث أن هذه الخرائط تسمح

بمحاكاة القياسات الميكرومترية المثالية لهذه النقاط في عدة مناطق لذات السطح [5].

و لكن فيما يتعلق بعملية القياس السطحي قد لا يكون اخذ القياس من منطقة المركز كافي لذلك يبين

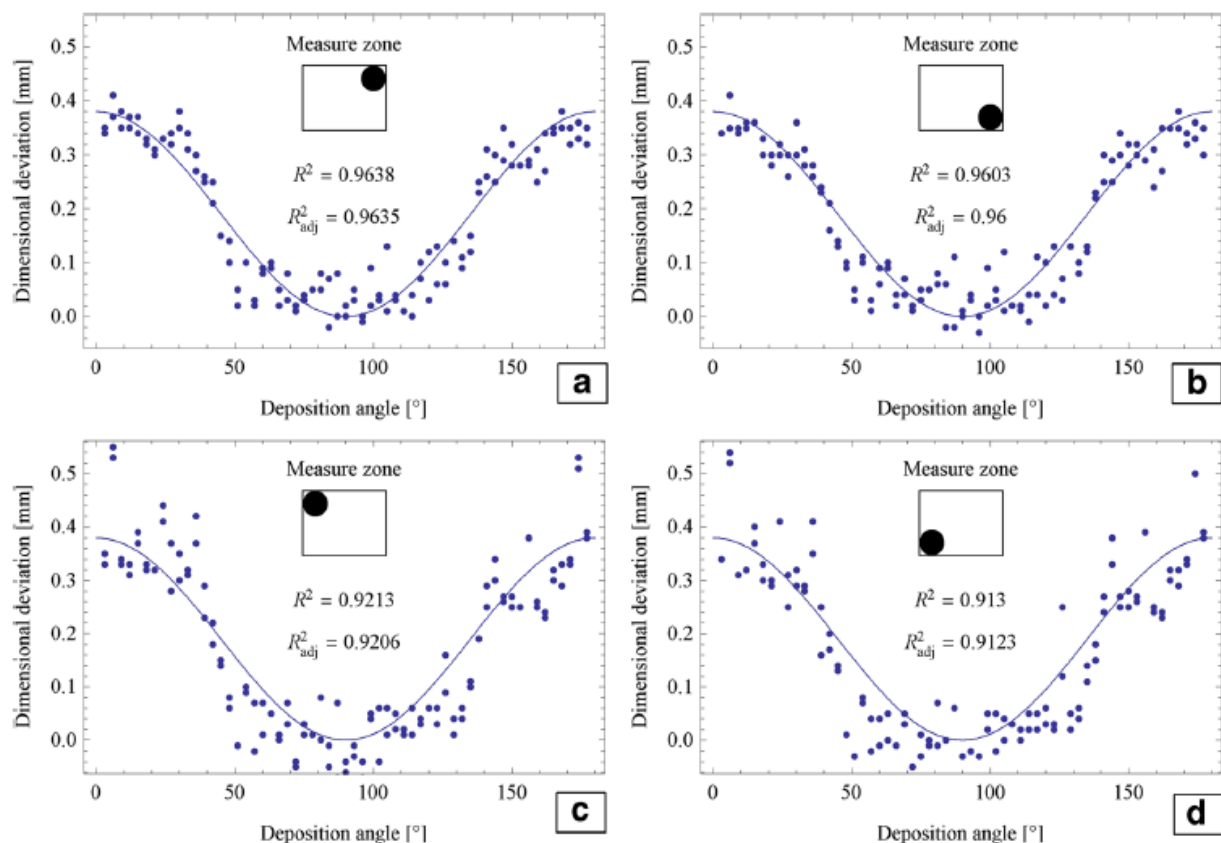
الشكل (7.5.2) الانحرافات من اربع مناطق اخرى عند زاوية ترسيب عامودية وسماكة طبقة 0.254

mm حيث نلاحظ ان توزع الانحرافات لا يختلف كثيرا عن الحالة السابقة (الشكل ( 5.5.2 )

إلا أن الشكل (8.5.2) (a, b) يكون بمتوسط mm0.5 أعلى منه في الشكل (8.5.2) (c,d). و بالتالي

فإن النموذج المقترح للقياس لا يأخذ بالحسبان موضع القياس والعيوب السطحية ، ولكن من وجهة

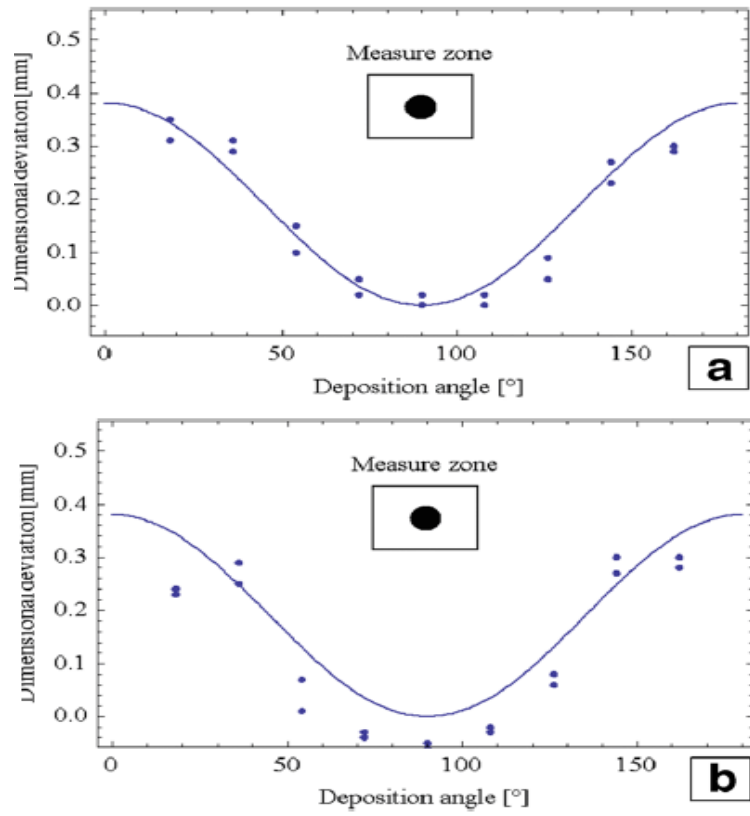
نظر إحصائية هناك اتفاق جيد بين مختلف مناطق القياس.



الشكل (8.5.2) الانحرافات من أربع مناطق أخرى عند زاوية ترسيب عمودية وسماكة طبقة

.[5]mm 0,254

وللتحقق من النموذج الذي اقترحته هذه الدراسة للقياس تمّ إجراء ذات التجارب للقياس السطحي عند زاوية ترسيب عمودية و سماكة طبقة 0.254 mm ولكن باستخدام مواد أخرى و يبين الشكل (9.5.2) مقارنة بين الانزياحات الحاصلة لعينات باستخدام مادة ULTEM™ 9085 (عبارة عن لدن حراري مثبت للهب يعمل في صناعة النقل نظراً لمعدل قوة الوزن المرتفع) و مادة البولي كربونات و هو أيضاً من اللدائن الحرارية ذات الخصائص الميكانيكية العالية ويتبين من الشكل (9.5.2) (a). كيف أن المادة الاولى تحقق توافق جيد مع القيم المتوقعة للنموذج وبالتالي يمكن توقع أبعاد النماذج المصنعة من هذه المادة في حين لا تظهر المادة الاخرى هذا التوافق الشكل (9.5.2) (b).



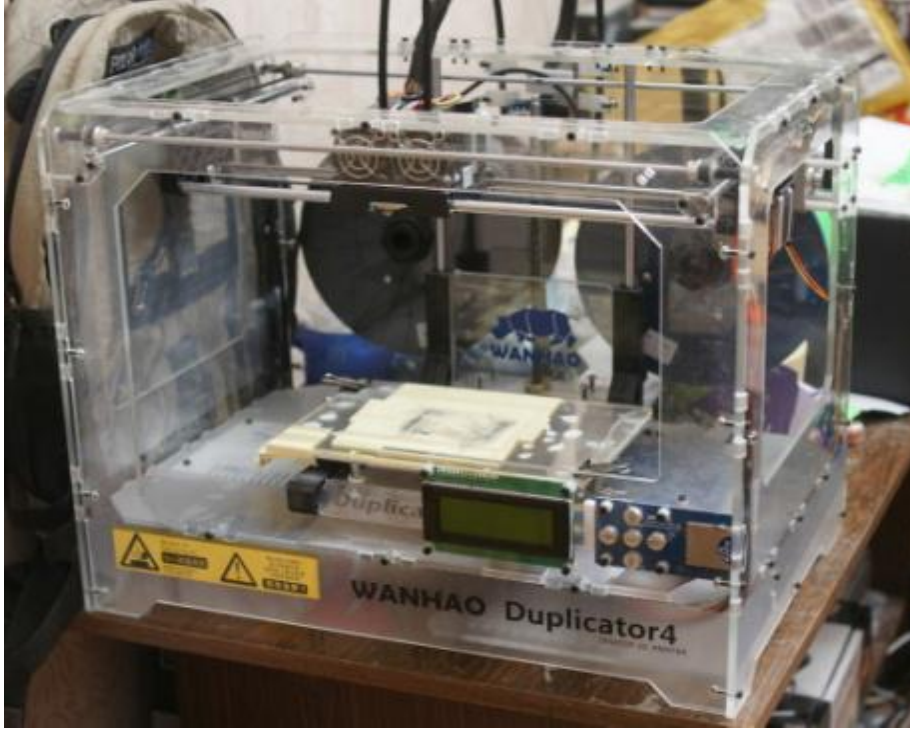
الشكل (9.5.2) مقارنة بين الانحرافات الحاصلة لعينات باستخدام مادة ULTEM™ 9085 ومادة البولي كربونات [5].

## Optimizing Dimensional Accuracy of Fused Filament Fabrication using Taguchi Design.

حيث قام الباحثون ( ZOI MOZA\*, KONSTANTINOS KITSAKIS, JOHN KECHAGIAS, NIKOS MASTORAKIS ) بدراسة بعنوان أمثلة دقة الأبعاد للتشكيل بتقانة الشعيرات المنصهرة (FFF) باستخدام طريقة تاغوشي (2017): [6] ونظرا لكون التصنيع بالشعيرات المنصهرة (FFF) تقانة تُستخدم عادةً للطباعة ثلاثية الأبعاد من أجل تلبية المتطلبات الوظيفية ، حيث يجب أن تكون نماذج FFF ذات دقة مقبولة. ، فإنه في الدراسة الحالية تم عرض تأثيرات برامترات العملية التي تؤثر على دقة الأبعاد للأجزاء المنتجة باستخدام طباعة FFF Duplicator 4X 3D منخفضة التكلفة. لذلك تم إجراء تسع تجارب باستخدام مصفوفة (Taguchi) العامودية. وشملت البرامترات المدروسة للعملية مواد الطباعة PM ، ومعدل الامتلاء IR ، وعدد من الهياكل NS وارتفاع الطبقة LH. حيث أن معدل الامتلاء يمثل النسبة المئوية التي توضح حجم النموذج الصلب الذي يجب ملؤه بالمادة عند طباعتها أما عدد الهياكل يدل على عدد الخطوط العريضة المطبوعة على كل طبقة من الجسم ويظهر مدى كثافة الجدران الخارجية، و تم قياس الأبعاد الخطية باستخدام أداة قياس رقمية بدقة 0.01 مم. وتم رسم مخططات الرسوم البيانية لتحليل المتوسطات (ANOM) للتحقيق في تأثير كل برامتر، وتم تحليل التباين (ANOVA) بهدف تحديد أهمية تباين كل برامتر بالنسبة للقياس المأخوذ كقيمة نسبية.

## الاجراء التجريبي:

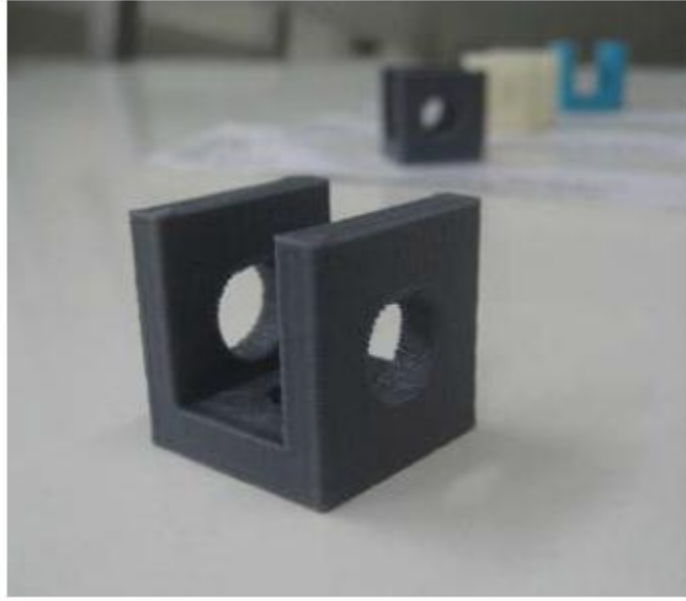
تمّ اجراء التجارب باستخدام طابعة 3D Duplicator 4X (الشكل 1.6.2) )) بإنتاج تسع نماذج (الشكل 2.6.2) )) ويبين الشكل ( 3.6.2 ) البناء التصميمي للنموذج الناتج.



الشكل (1.6.2) طابعة 3D Duplicator 4X [6].



الشكل ( 2.6.2 ) نماذج تجريبية [6].



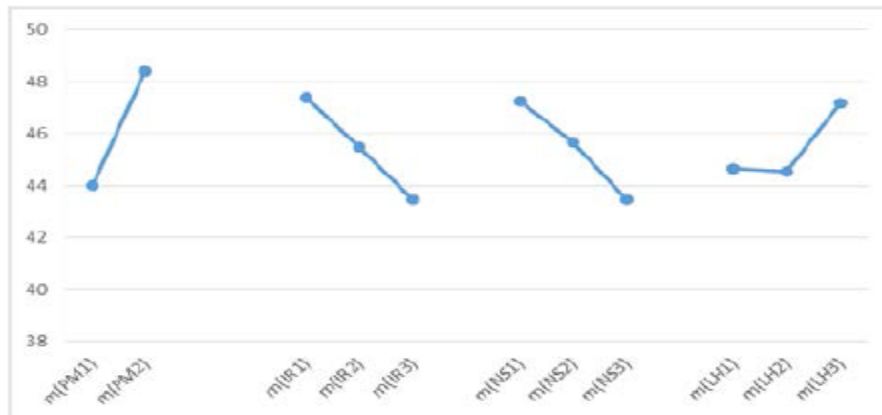
الشكل (3.6.2) عينة اختبار [6].

وتمّ اعتماد مادتين للطباعة هما أكريلونيتريل بيوتادين ستايرين (ABS) وحمض بولي لاكت (PLA), فيما تمّ اعتماد ثلاث متغيرات لكل واحد من البرامترات الأخرى كما هو في الجدول (2.6.2) توزيع تغير هذه البرامترات ضمن تسع حالات (النماذج) حسب مصفوفه تاغوشي بالإضافة إلى أبعاد كل حالة على محاور  $x$   $y$   $z$ .

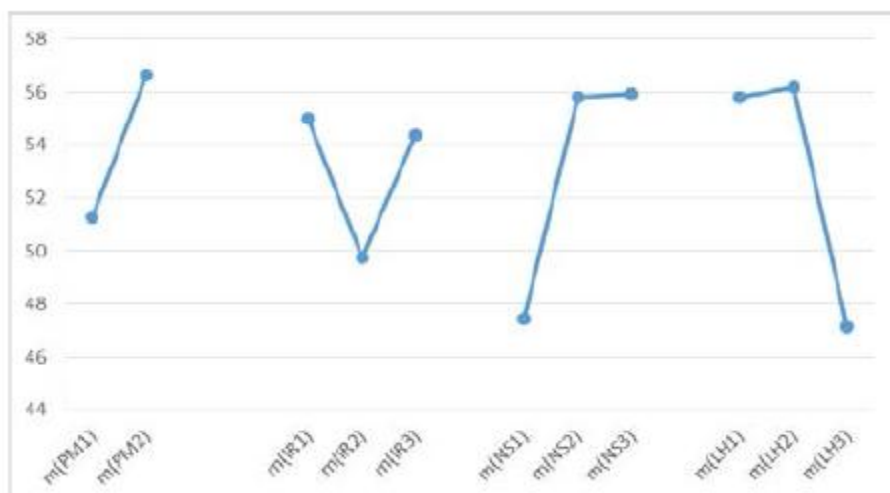
الجدول (2.6.2) توزيع تغير هذه البرامترات ضمن تسع حالات (النماذج) حسب مصفوفه تاغوشي

| No of Exp. | Process Parameters |    |    |     | Dimensional Performance ( $\eta_i$ ) |          |
|------------|--------------------|----|----|-----|--------------------------------------|----------|
|            | PM                 | IR | NS | LH  | XY Plane                             | Z Height |
| 1          | 1                  | 20 | 1  | 0.1 | 47.74                                | 55.44    |
| 2          | 1                  | 50 | 2  | 0.2 | 44.17                                | 58.98    |
| 3          | 1                  | 70 | 3  | 0.3 | 42.56                                | 54.71    |
| 4          | 2                  | 50 | 3  | 0.1 | 45.61                                | 58.99    |
| 5          | 2                  | 70 | 1  | 0.2 | 47.29                                | 55.48    |
| 6          | 2                  | 20 | 2  | 0.3 | 52.27                                | 55.43    |
| 7          | 1                  | 70 | 2  | 0.1 | 40.60                                | 52.95    |
| 8          | 1                  | 20 | 3  | 0.2 | 42.21                                | 54.09    |
| 9          | 1                  | 50 | 1  | 0.3 | 46.72                                | 31.33    |
| average    |                    |    |    |     | 45.46                                | 53.04    |

ويبين الشكل (5.6.2)، (4.6.2) النتائج المستحصلة لاختبار ANOM باتجاه x,y وباتجاه z بالترتيب، أما الجداول (3.6.2) و (4.6.2) فتبين نتائج تحليل (ANOVA) القيم النسبية لأهمية برامترات العملية.



الشكل (4.6.2) النتائج المستحصلة لاختبار ANOM باتجاه x,y [6].



الشكل (5.6.2) النتائج المستحصلة لاختبار ANOM باتجاه z [6]

الجدول ( 3.6.2 ) والجدول ( 4.6.2 ) نتائج تحليل (ANOVA) ل x,y و z[6]

|       | DoF | SoS    | MS    | %     |
|-------|-----|--------|-------|-------|
| PM    | 1   | 38.59  | 38.59 | 39.9% |
| IR    | 2   | 23.10  | 11.55 | 23.9% |
| NS    | 2   | 21.76  | 10.88 | 22.5% |
| LH    | 2   | 13.29  | 6.64  | 13.7% |
| Total | 7   | 96.750 |       |       |

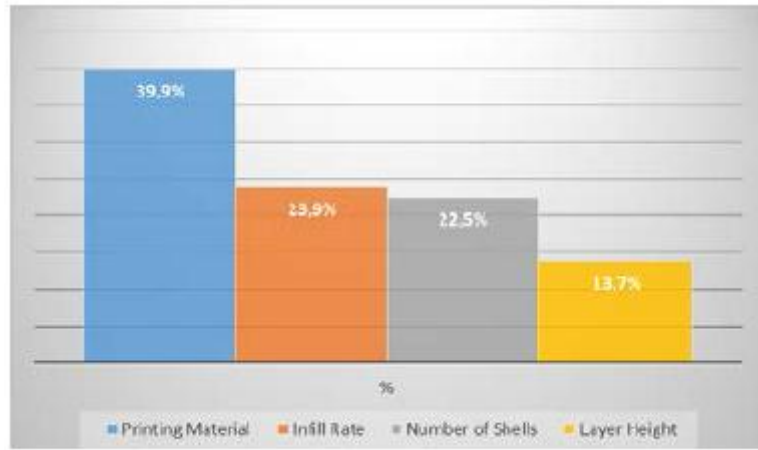
Table 3. ANOVA for XY plane

|       | DoF | SoS    | MS    | %     |
|-------|-----|--------|-------|-------|
| PM    | 1   | 58.01  | 58.01 | 14.3% |
| IR    | 2   | 48.86  | 24.43 | 12.0% |
| NS    | 2   | 142.66 | 71.33 | 35.2% |
| LH    | 2   | 156.17 | 78.08 | 38.5% |
| Total | 7   | 405.71 |       |       |

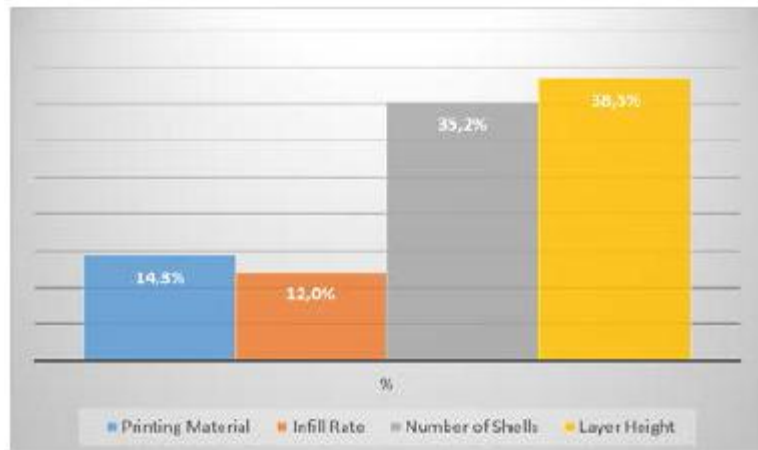
Table 4. ANOVA for Z direction

تشير النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها إلى أن برامترات العملية التي تؤثر على دقة الأبعاد في مستوى XY لا تتبع النمط نفسه في اتجاه Z. ومن الشكل ( 6.6.2 ) و ( 7.6.2 ) يمكننا تحديد المستوى الأمثل لكل برامتر ومن الجدول الجدول ( 3.6.2 ) والجدول ( 4.6.2 ) نحدد الأهمية النسبية لكل برامتر في دقة الأبعاد.

تشير النتائج التجريبية إلى أن دقة الأبعاد في مستوى XY تتأثر بشكل أساسي على الترتيب: بمواد الطباعة ، يليها معدل إعادة الملء وعدد الهياكل ويبين الشكل 8 نسبة تأثير كل منها. أما في اتجاه Z تشير النتائج إلى أن جميع العوامل لها تأثير كبير في دقة الأبعاد ، مع عامل مهيم هو ارتفاع الطبقة كما هو في الشكل ( 6.6.2 ).



الشكل (6.6.2) النسبة المئوية لأهمية المعاملات بالنسبة لمستوى X,y



الشكل (7.6.2) النسبة المئوية لأهمية المعاملات بالنسبة لاتجاه Z

وبينت النتائج تأثير استخدام مادة طباعة PLA في كل من الاتجاهات و عند كل برامتر من البارامترات الثلاثة الجدول (5.6.2) حيث نلاحظ مثلاً تساوي تأثير معدل الملء في الحالتين.

الجدول (5.6.2) بارامترات المراحل الأفضل [6].

|             | PM  | IR  | NS | LH     |
|-------------|-----|-----|----|--------|
| XY plane    | PLA | 20% | 1  | 0.3 mm |
| Z direction | PLA | 20% | 3  | 0.2 mm |

## Effect of Nozzle Geometry on Melt Flow Simulation and Structural Property of Thermoplastic Nanocomposites in Fused Deposition Modeling

حيث قام الباحثون ( MD EASIR ARAFAT PAPON, ANWARUL HAQUE and MUHAMMAD ALI ROB SHARIF ) بدراسة بعنوان تأثير هندسية الفوهة على خصائص تركيب و محاكاة تدفق المنصهر للمراكبات النانوية المتلدنة في تقانة الطباعة عن طريق تشكيل الراسب المنصهر (2017): حيث تركز هذه الورقة في دراسة تأثيرات هندسية بثق الفوهة ، على سلوك التدفق الذائب داخل حجرة التسييل FDM وحجم المحتويات الفارغة (الفجوات) ، وأداء الياف الكربون النانوي (CNF) المقوى بعناصر نانوية متلدنة. و لذلك تمّ إعداد نموذج حسابي للتدفق اللانيوتني عن طريق نمذجة التدفق المنصهر لمزيج من CNF مع عناصر نانوية من البولي لاكت PLA لفهم سلوك برامترات الطباعة بتقانة FDM ، حيث ان خصائص الانسياب تختلف باختلاف نسبة ال CNF 0% , 0.5% , 1% ، وتمّ إعداد نموذج للقناة الخاصة بالبثق بتقانة ال FDM ، وتمّ دراسة سلوك تدفق الذوبان من حيث انخفاض الضغط ، ومخطط سرعة مخرج الفوهة ، ودرجة الحرارة المحورية من خلال خاصية المواد المتغيرة وهندسة الفوهة. وتمّ اعتماد فوهة للسائل ذو شكل نجمي من أجل تحسين البناء الانتشاري مع اصغر الفراغات. و تمّ مقارنة نتائج عمليات المحاكاة العددية مع تلك الخاصة بالنماذج الموجودة والمنشورة والتي تُظهر اتفاقاً معقولاً. وقد تمّ طباعة عينات شد باستخدام أقطار فوهة بثق مختلفة الأقطار للاختبارات الميكانيكية. يُظهر الفحص المجهرى البصري وجود محتويات ذات فراغات مثلية ومعينية الشكل في المركبات النانومترية PLA / CNF المطبوعة. وتُظهر المركبات النانومترية المطبوعة من FDM مُعالجاً محسناً وقوة إنتاجية مقارنةً ب PLA الصافي [7].

كما تتناول هذه الورقة سلوك تدفق السوائل النانوية باستخدام نموذج التدفق غير النيوتوني عن طريق محاكاة انماط لدرجات الحرارة وانخفاض الضغط وسرعة أشكال فوهة البثق بأقطار وزوايا مختلفة.

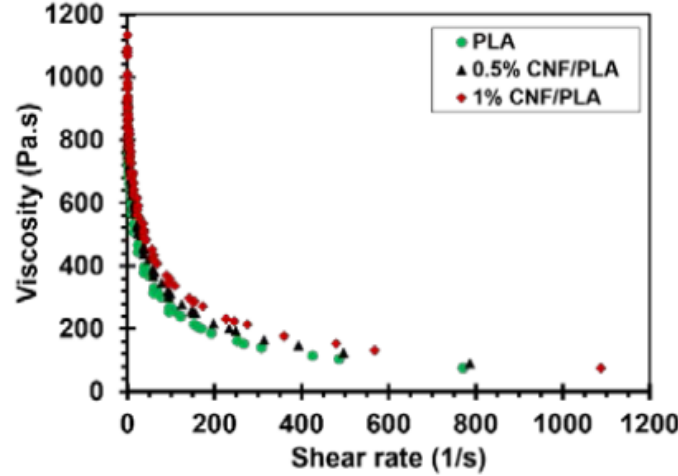
كما تمّ قياس الخواص الانسيابية لمواد العمل تجريبياً باستخدام اختبار الانسياب القياسي. لفهم تدرج درجة الحرارة ، وتمّ تطوير نموذج ديناميكي (CFD) للسوائل مدمج ثلاثي الأبعاد لعرض درجة الحرارة في داخل السائل وكذلك درجة حرارة الأجسام المحيطة بالمركب.

أهم المراحل التي مرت بها هذه الدراسة:

اختبار الانسيابية:

أجريت دراسة تجريبية لآثار اختلاف نسب مادة الـ CNF على خصائص الشد لمطبوعة 3D من PLA و مزيج PLA/ CNF . وتم إجراء اختبار الشد باستخدام جهاز MTS وفقاً للمعيار ASTM حيث تم اختبار أربعة عينات في كل فئة. وتم دراسة تأثير ألياف الكربون وفقاً لمخططات توتر-إجهاد القياسية .

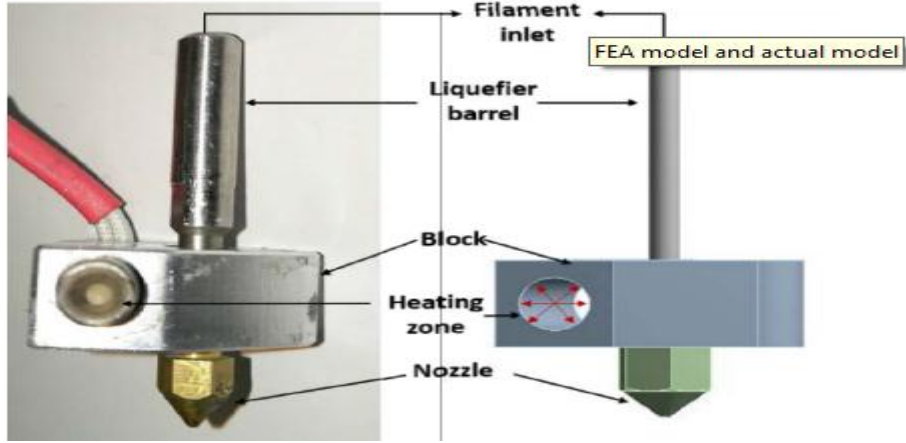
إن الطبيعة اللزجة لمركب CNF / PLA في البثق السائل أمر بالغ الأهمية في وصف سلوك التدفق من خلال فوهة البثق. وعادةً ما تكون مادة البثق في عمليات التصنيع التجميعي AM عبارة عن قصاصات رقيقة وتظهر فيها خصائص التدفق اللانيوتونية. وقد تم قياس لزوجة المركبات النانومترية CNF / PLA ذات نسبة وزن مختلفة من 0% , 0.5% , 1% تجريبياً ، والتي تم رسمها كمنحني لمعدل القص بالنسبة للزوج عند 200 درجة مئوية في الشكل (1.7.2) . حيث نلاحظ التناسب العكسي بينهما في جميع النسب.



الشكل (1.7.2) منحني معدل القص بالنسبة للزوج [7].

### إعداد النموذج ثلاثي الأبعاد لتحليل نقل الحرارة المقترن بآلية البثق:

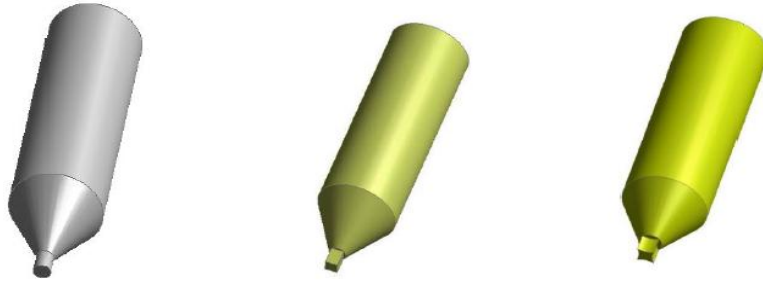
ان مكونات النمذجة الحرارية تتكون من برميل المادة المنصهرة ، كتلة سخان الألومنيوم والفوهة، لذلك تم تطوير نموذج ثلاثي الأبعاد بالكامل للمحاكاة الرقمية. مع إهمال حزم المصهور المحسوبة كجزء من كتلة الألومنيوم في نموذج 3D ويوضح الشكل (2.7.2) النموذج الأولي والنموذج الثلاثي الأبعاد الخاص بتركيب المادة المُسالَة والفوهة.



الشكل (2.7.2) النموذج الأولي والنموذج الثلاثي الأبعاد الخاص بتركيب المادة المُسالَة والفوهة [7].

### تحليل التدفق للنموذج المقطعي للفوهة :

أجريت محاكاة لنموذج محدود الحجم (FVM) من خلال النظر في ثلاث زوايا فوهة من 60 ، 90 ، 120 درجة وست اشكال للمقاطع العرضية للفوهة. أربعة منها دائرية بأقطار من 0.2 ، 0.3 ، 0.4 ، 0.5 مم ، والاثنان الآخران على شكل مربع وشكل نجمي . الأخيرتان لهما نفس مساحة المقطع والتي تعادل فوهة دائرية قطرها 0.4 مم. يوضح الشكل (3.7.2) نموذج مختلف الاحجام الداخلية للفوهة التي تم أخذها بالحسبان للمحاكاة.

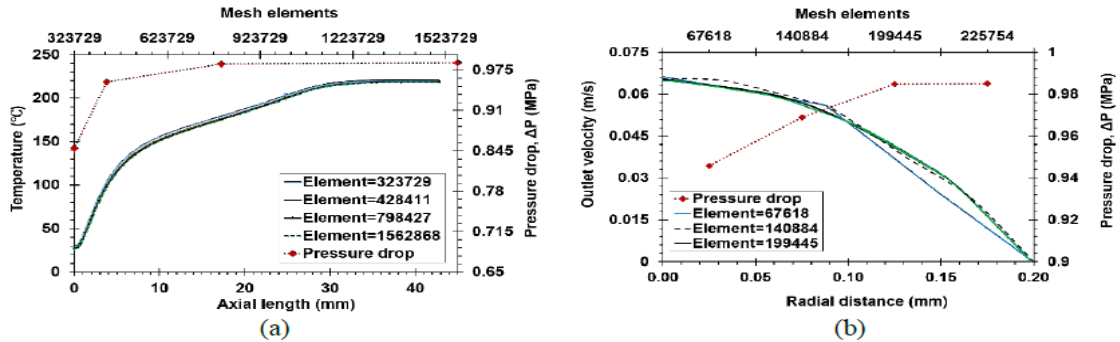


الشكل (3.7.2) نموذج مختلف الاحجام الداخلية للفوهة [7].

## دراسة توليد الشبكة والشبكة المستقلة:

يتم إجراء دراسات استقلالية الشبكة المتناسقة عن طريق تنقيتها بشكل متتالي من أجل كامل النموذج لتحديد دقة الشبكة المثلى. النمط الحراري على طول الخط المركزي للسوائل وانخفاض الضغط تمت ملاحظتها لكامل الشبكة (النموذج التجميعي للشبكة) وتم رسمها في الشكل 4.5. مع الزيادة في عدد العناصر الشبكية ولم يتم العثور على اختلاف كبير لأنماط درجة الحرارة ولكن بالنسبة لانخفاض الضغط الفرق واضح والنموذج الأمثل يكون مع 427,798 من العناصر التي لا يلاحظ بعدها أي تغييرات كبيرة.

أما بالنسبة للنموذج المقطعي للفوهة ، تم تنفيذ دراسة عند أقطار خروج مختلفة وزوايا فوهة. وقد ظهر في الشكل (b) (4.7.2) إحدى هذه الدراسات لفوهة 0.4 مم. بالنسبة لنموذج الفوهة المقطعة ، وتم تحقيق استقلالية الشبكة مع 140,884 عنصرًا ، وبعد ذلك لا يلاحظ أي تغييرات مهمة. ويوضح الشكل (5.7.2) توزيع الشبكة لكلا الطرازين.



الشكل (4.7.2) دراسة استقلالية الشبكة

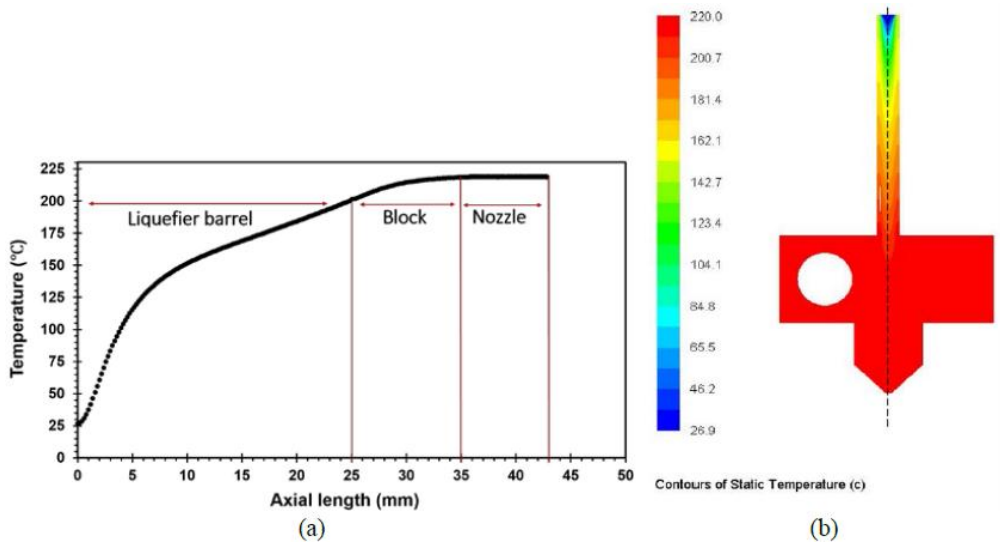


الشكل (5.7.2) توزيع الشبكة [7].

## نتائج النمذجة الحرارية:

يوضح الشكل (a) (6.7.2) مخطط تغير درجة حرارة المادة PLA على طول خط المنتصف للنموذج المدروس (فوهة ،خزان, المادة المنصهرة ..الخ) حيث تدخل حزم ال PLA في درجة حرارة الغرفة ب(26 درجة مئوية) وبمجرد أن تصل للخزان الاسطواني للمادة ، تبدأ درجة الحرارة في الارتفاع حتى يصل PLA إلى نقطة انصهاره (175 درجة مئوية) بعد عبور ثلثي برميل السائل ، وصولاً للفوهة حيث تكون الحرارة مشابهة تقريباً.

أما الشكل (b) (6.7.2) فيوضح التوزيع الحراري على كامل المقطع الطولاني للنموذج المدروس. حيث أن توزيع درجة الحرارة ليس متجانساً في أقسام مختلفة للنموذج من نقطة التغذية حتى كتلة الالمنيوم والفوهة. حيث انه عند مدخل خزان المادة المنصهرة ترتفع درجة الحرارة بسرعة إلى حوالي 150 درجة مئوية ، ثم تزداد تدريجياً إلى 220 درجة مئوية وصولاً للفوهة .



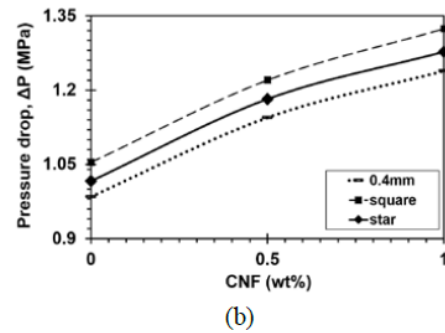
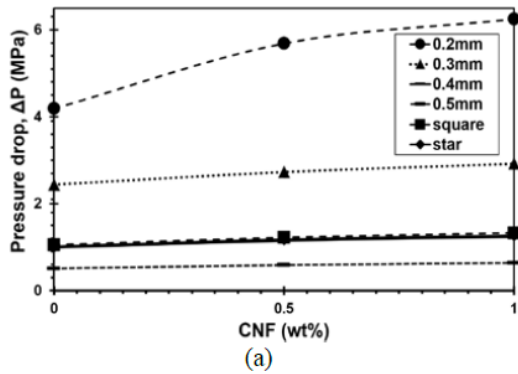
الشكل (6.7.2) (a) مخطط تغير درجة حرارة المادة PLA على طول خط المنتصف للنموذج

(b) التوزيع الحراري على كامل المقطع الطولاني للنموذج المدروس [7].

## هبوط الضغط:

ان هبوط الضغط المحسوب  $\Delta P$  عبر قسم الفوهة المتحصل عليه من تحليل النموذج المقطعي يتم رسمه كمنحني بالنسبة لاختلاف نسبة وزن CNF في الشكل (a) (7.9.2) وذلك عند أشكال مختلفة للفوهة وأحجامها. وتم الحصول على قيم  $\Delta P$  لستة أقطار للفوهة عند زاوية فوهة (60 درجة).و

نلاحظ من الشكل كيف ان قيمة  $\Delta P$  تزداد بشكل تدريجي مع ازدياد نسبة وزن CNF عند مختلف الأقطار والاشكال للفوهة و لكن يختلف مقدار هذا الازدياد و الذي نجد أكبر قيمة له عند الفوهة ذات المقطع الدائري بقطر 0.2 mm , أما في الشكل (b)(7.2) تظهر المقارنة البيانية لقيم هبوط الضغط عند مقاطع عرضية مختلفة للفوهة مثل الشكل الدائري والمربع والنجم وذات المقطع العرضي المكافئ لفوهة دائرية بقطر 0.4 مم, ولوحظ أعلى  $\Delta P$  للفوهة عند الشكل المربع يليه النجمي والذي يكون أعلى نسبيا من الفوهة دائرية. إلا أن هذا قد يكون له تأثير كبير في الانتفاخ بمجرد خروج المصهور من الفوهة.



الشكل (7.2)(a) هبوط الضغط المحسوب  $\Delta P$  عبر قسم الفوهة المتحصل عليه من تحليل النموذج المقطعي يتم رسمه كمنحني بالنسبة لاختلاف نسبة وزن CNF (b) تظهر المقارنة البيانية لقيم هبوط الضغط عند مقاطع عرضية مختلفة للفوهة [7].

و يوضح الشكل (8.7.2(b)) تأثير زوايا الفوهة على هبوط الضغط لنسبة الوزن المختلفة لمركب نانوي PLA / CNF. وتشير النتائج إلى أنه مع زيادة زاوية الفوهة ، تنخفض قيم هبوط الضغط  $\Delta P$  التي تزداد بازدياد المركب النانوي, ومن الملاحظ في الشكل (8.7.2)(a) أنه يتم الحفاظ على الضغط العالي الأولي لتدفق المواد حتى يصل التدفق إلى الجزء القريب من الفوهة ليبدأ هبوط الضغط بشكا متسارع وصولاً للمخرج.

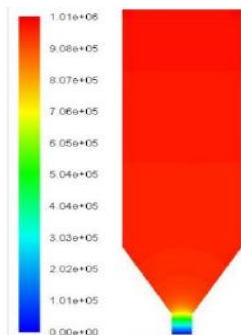


Figure 9a. Pressure drop at nozzle (MPa)

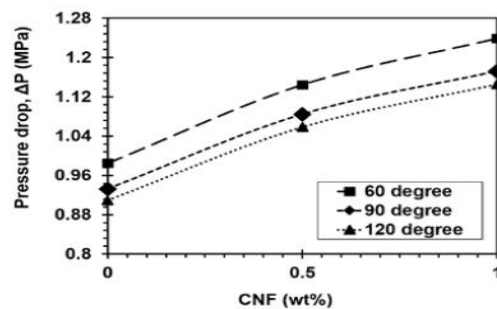


Figure 9b. Effect of nozzle angle on pressure drop

الشكل (8.7.2) (a) هبوط الضغط في الفوهة (b) تأثير زوايا الفوهة على هبوط الضغط لنسبة الوزن المختلفة لمركب نانوي PLA / CNF [7].

ويوضح الشكل (a) (9.7.2) متجهات السرعة وقيمها بالقرب من منطقة خروج فوهة على طول المقطع الطولي للنموذج (0.4 مم قطر ، زاوية 60 درجة).

بينما يوضح الشكل (b) (9.7.2) مخطط السرعة المحوري عند مخرج الفوهة والذي يُظهر انخفاض قيم السرعة مع ازدياد المسافة القطرية للفوهة وذلك باستخدام عدة أنواع من المصاهر ( 1% and 0.5% CNF in PLA ) حيث لا تظهر اي تأثير يذكر لاختلاف المادة المصهورة على الخاصية المدروسة.

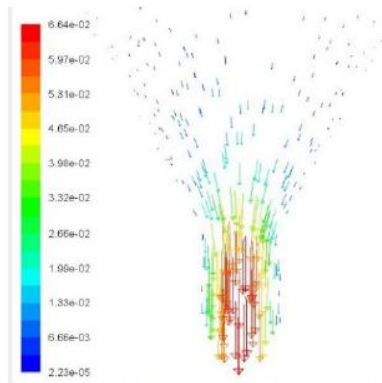


Figure 10a. Velocity vector at nozzle outlet

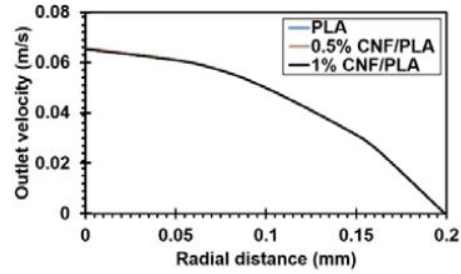


Figure 10b. Velocity profile at nozzle outlet

الشكل (9.7.2) (a) أشعة السرعة عند مخرج الفوهة (b) مخطط السرعة المحوري عند مخرج الفوهة [7].

سرعة الخروج أو البثق:

في الشكل (a) (10.7.2) تم مقارنة تغير سرعة الخروج المحورية بالنسبة للمسافة القطرية لمختلف أشكال وأحجام باستخدام مادة PLA النقي. حيث نلاحظ أنه مع انخفاض قطر الفوهة ، تكون السرعة أعلى في مركز المخرج و خصوصا عند الفوهة ذات الشكل الدائري نسبياً للشكل المربع و النجمي. كما يظهر الشكل (b) (10.7.2) بالنسبة للفوهات ذات المساحة السطحية المتشابهة ، فإن السرعة المركزية تبقى على حالها تقريباً ، وبالنسبة للفوهة ذات الشكل النجمي ، يكون انخفاض السرعة على طول الزاوية أكثر سلاسة من فوهة المربع. وهذا قد يحسن من خصائص انتفاخ المصهور و شكل التوضع له.

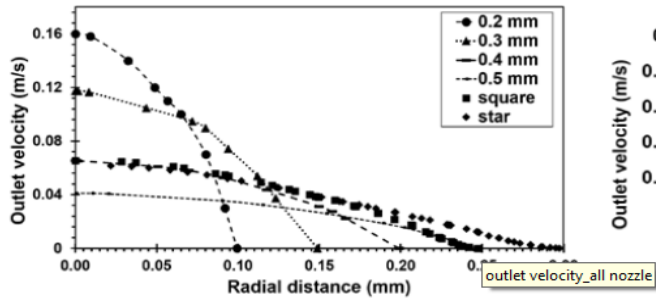


Figure 11a. Velocity profile at outlet for varying nozzle diameter

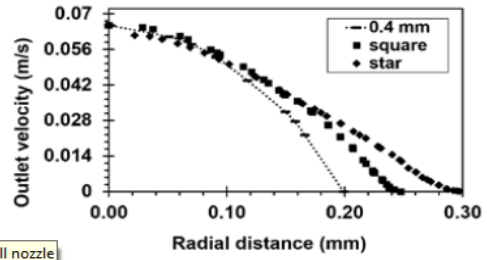
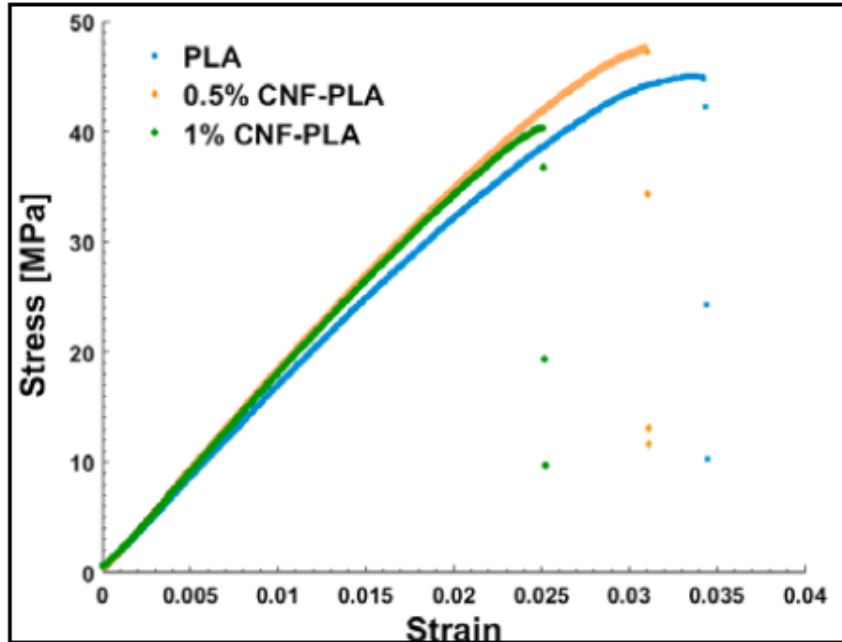


Figure 11b. Velocity profile for nozzles

الشكل (10.7.2) تغير سرعة الخروج المحورية بالنسبة للمسافة القطرية لمختلف أشكال وأحجام باستخدام مادة PLA النقي [7].

### الخصائص الميكانيكية:

ويبين الشكل (11.7.2) منحنيات إجهاد-توتر للمركبات النانوية PLA النقي و PLA / CNF النانوية بتركيز 0.5% و 1%. حيث تظهر المنحنيات معدلات متقاربة لمتوسط مجموعة البيانات بين أربع عينات اختبار في كل فئة (نوع المادة). حيث تظهر جميع المنحنيات اتجاهًا خطيًا لقيم الإجهاد حتى يصل إلى مستوى إجهاد مرتفع جدًا، ثم تصبح غير خطية قبل الانقطاع النهائي، كما تبين زيادة معامل يونغ كلما ارتفعت تركيزات CNF من 0.5% إلى 1%.



الشكل (11.7.2) منحنيات إجهاد-توتر للمركبات النانوية PLA النقي و PLA / CNF النانوية بتركيز 0.5% و 1% [7].

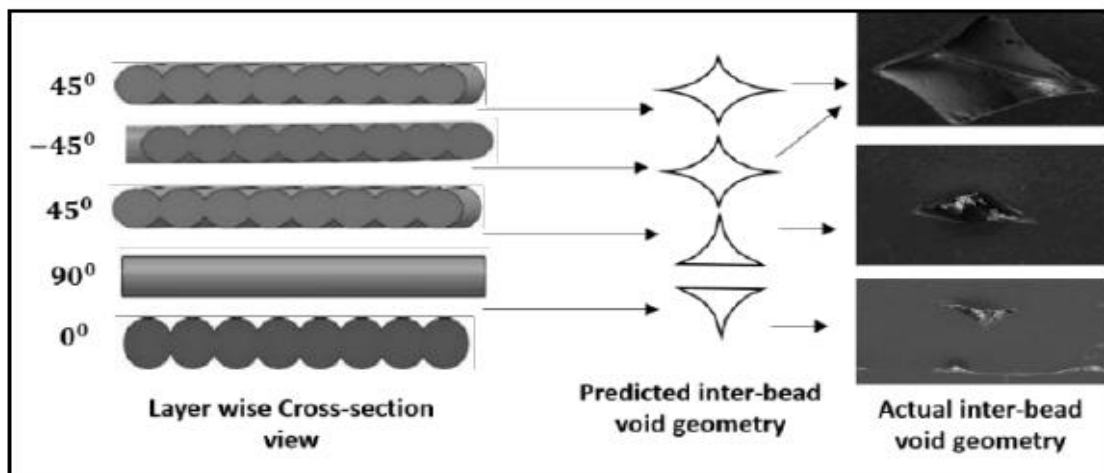
## المحتويات الفراغة (الفجوات):

تمّت دراسة العينات من خلال فحوصات مجهرية ضوئية لقياس محتويات الفراغ كدالة لتركيزات CNF المختلفة، وقد أجريت الدراسة على هذه الصور لتحديد النسب المئوية للفراغات . ويبين الجدول ( 1.7.2 ) الحجم التقريبي للفراغات ذات التحدب الدفين والنسبة المئوية لمحتويات الفراغ في PLA، CNF / PLA 0.5% و 1% من عينات CNF / PLA بالإضافة لأصغر الاحجام و أكبرها من هذه الفراغات.

الجدول ( 1.7.2 ) الحجم التقريبي للفراغات ذات التحدب الدفين والنسبة المئوية لمحتويات الفراغ [7].

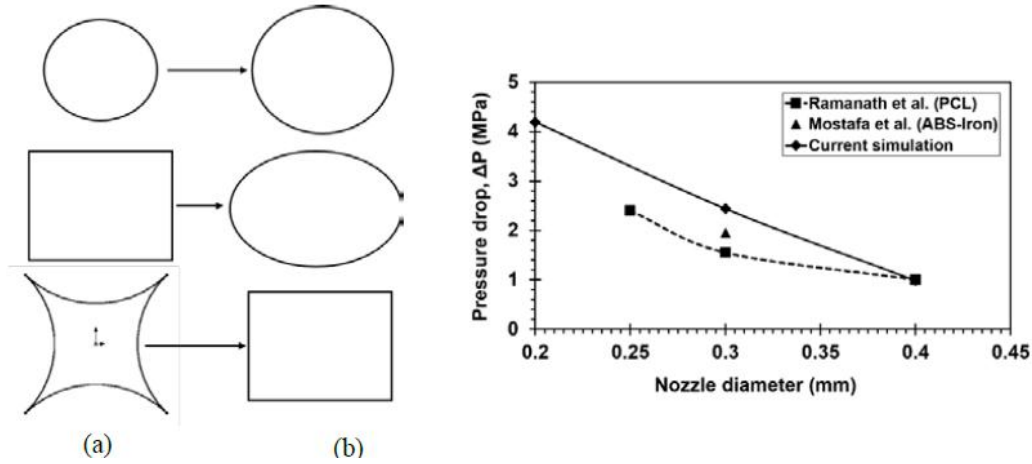
| Sample       | Cross-section (mm <sup>2</sup> ) | Largest Void (mm <sup>2</sup> ) | Smallest Void (mm <sup>2</sup> ) | Void Percentage (%) | Contact Angle (°) |      |
|--------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------|-------------------|------|
|              |                                  |                                 |                                  |                     | 90°/0°            | ±45° |
| PLA          | 12                               | 0.05                            | 0.0025                           | 15.70               | 128°              | 153° |
| 0.5% CNF/PLA | 12                               | 0.05                            | 0.0034                           | 17.70               | 125°              | 138° |
| 1% CNF/PLA   | 12                               | 0.06                            | 0.0036                           | 20.70               | 128°              | 134° |

واعتمادًا على نشوء التحدبات بشكل متسلسل ، لوحظ نوعين من الاشكال الهندسية للفراغات الدفينة ذات شكل القريب من المثلث وشكل الماسي، حيثتشكلت الفراغات على شكل الماس عندما كانت اتجاهات الطبقة المطبوعة 45/-45 أو 45/45-درجة ولوحظت فراغات على شكل مثلث عند اتجاهات 90/0 و 0/90 و 90/45 و 45/90 درجة. ويبين الشكل (12.7.2) التحدبات المجوفة للأشكال المثلثية و الماسية (معين) المحسوبة وأشكال الفراغات المتحدبة الناتجة عن مجموعة من الصور الميكروسكوبية.



**الشكل (12.7.2)** التحديبات المجوفة للأشكال المثبتية و الماسية (معين) المحسوبة وأشكال الفراغات المتحدبة [7].

تم في هذا البحث إجراء عمليات محاكاة لتأثير الأشكال الهندسية المختلفة للفوهة على السرعة وهبوط الضغط، أما الخطوة التالية فهي دراسة ظواهر الانتفاخ لهندسة الفوهة ومعرفة العلاقة بين انخفاض الضغط والسرعة مع الانتفاخ الأفقي والعمودي ، ومن خلال التحكم في هذه البارامترات من عملية البثق وشكل الفوهة ، يمكن الحصول على شكل مستطيل من المادة المنبتقة كما هو موضح في الشكل (13.7.2) و الذي يعطي انخفاض المحتويات الفارغة (الفجوات) وزيادة جودة التشكيل. حسابات الضغط التي أجريت في هذا العمل اظهرت الاتفاق الوثيق مع الدراسات السابقة باستخدام المواد المختلفة كما الشكل (13.7.2) ، حيث أن الخصائص الانسيابية تختلف باختلاف المواد ، و بالتالي فإن النتائج تتحرف عن بعضها البعض ولكن تبقى حدودها ضمن النطاق.



**الشكل (13.7.2)** تأثير الأشكال الهندسية للفوهة والشكل (14.7.2) مقارنة انخفاض الضغط مع البحث المنشور

في النهاية نجد أنه قد تم دراسة خصائص تدفق المصهور لمركبات النانوية المتلدنة بالحرارة من خلال دراسة نموذج سيلان-حراري (fluidic model) لمجموعة FDM الكاملة. كما تم التحقق من قيم هبوط الضغط وتدرجات السرعة لأقطار وأشكال الفوهة المختلفة وزوايا الفوهة. وأجريت الاختبارات الميكانيكية والفحص المجهرى جنباً إلى جنب مع التجارب الانسيابية. وتم دراسة الخواص الميكانيكية والمحتويات الفارغة (الفجوات) و أشكالها الهندسية وزوايا طباعة الطبقات، كما تم التحقق البياني لنتائج هذه الدراسة مع نتائج الدراسات السابقة.

## 8.2. الدراسة الثامنة:

### Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling

حيث قام الباحثون (Alberto Boschetto, Luana Bottini) بدراسة بعنوان تصميم عملية تصنيع السطوح لتحسين دقة الطباعة بتقانة تشكيل الراسب المنصهر FDM (2016): [8] نظراً لكون تقانة التشكيل بالراسب المنصهر هي من تقنيات التصنيع التجميعي القادرة على تصنيع النماذج الأولية والأدوات والأجزاء الوظيفية دون قيود أو تعقيد هندسي. وعلى الرغم من المزايا المحتملة لهذه التقانة ، فإن الجانب المحدود لنشرها الصناعي هو الدقة التي يمكن الحصول عليها، حيث أبرزت الدراسات أن هناك انحرافات كبيرة عن القيم الاسمية: هذه الانحرافات ليست ثابتة بشكل عام على أسطح الجزء لكنها تعتمد بشكل صارم على برامترات العملية أي كل من ثخانة الطبقة وزاوية الترسيب، و هذا يعطي جودة سطحية منخفضة ، و بالتالي الأجزاء لا يمكن أن تلبي مواصفات التصميم ولا تضمن الأداء الوظيفي والتوافق مع المكونات الأخرى.

إن الهدف من هذا العمل هو تطوير تصميم لمنهجية التصنيع قادرة على تحسين دقة الأبعاد التي يمكن الحصول عليها بواسطة هذه التقانة. و تعمل ضمن مرحلة تصميم النموذج على اعداد نموذج افتراضي من أجل التعويض عن انحرافات الأبعاد المذكورة أعلاه . وبهذه الطريقة يمكن الحصول على أجزاء ذات ابعاد قريبة جداً من القيم الاسمية. ولا تتطلب هذه الطريقة أي موارد إضافية لتطبيقها فهي تشبه القياس و البناء اليدوي الاولي للعملية. إن الهدف النهائي هو إعادة تصميم شكل المنتج من أجل الحصول على تحسين كبير في دقة الجزء المصنعة وتطبيق المنهجية المقترحة على الصياغة الرياضية للنموذج الافتراضي.

وقد تمّ تنظيم بقية الورقة البحثية على النحو التالي: تمّ تصميم ثلاث حالات ذات تعقيدات هندسية مختلفة وصنعت قبل وبعد DFM؛ (Design for Manufacturing) (و هي أحد المنهجيات المعروفة لتخفيف تعقيدات التصنيع و تكلفته ) وتمّ قياس العينات و تحليل نتائج قياسات الأبعاد واستخدامها للمقارنة ؛ واستخلاص النتائج اللازمة من هذا البحث.

## الإجراء التجريبي للدراسة:

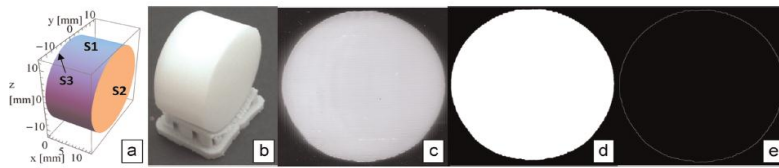
تم تطبيق المنهجية المذكورة أعلاه على ثلاث حالات: الأسطوانة ، والمفصل الكروي وشفرة المروحة تصنع من مادة أكريلونيتريلالبيوتادينالستايرين ABS. و تم تصنيع كلا النموذجين الأصلي والمعدّل من أجل المقارنة. كما تم استخدام تقانة القياس لمقارنة أقسام الأسطوانة والمفصل الكروي وشفرة المروحة قبل وبعد تطبيق D F M. و تمت عمليات القياس باستخدام ماسح ضوئي و مقياس ميكرومتر (الشكل (1.8.1)) مزود بذراع عمودي متحرك يحمل مؤشر Borlettial الذي يتميز بالدقة .



الشكل (1.8.2) جهاز قياس الشخانة

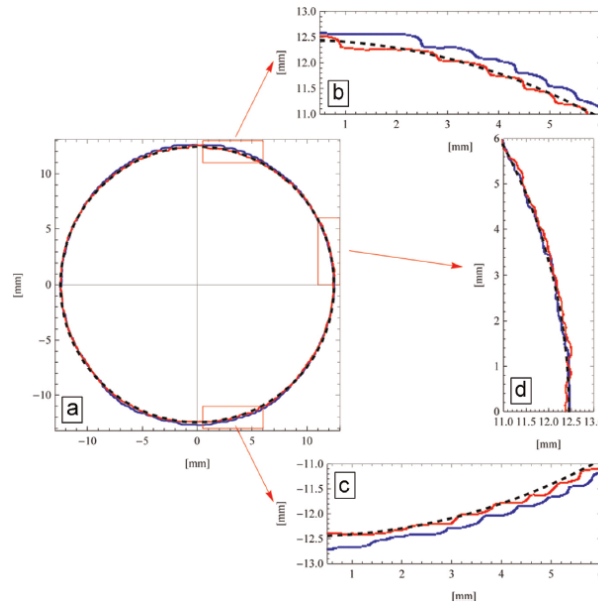
## دراسة حالة الاسطوانة:

يبين الشكل (a)(2.8.2) النموذج الافتراضي بأبعاده الاسمية و بثلاثة وجوه S1, S2, S3 و من الشكل (b)(2.8.2) يمكن أن نشاهد النموذج الناتج بأبعاده الحقيقية بزوايا ترسيب من 135 درجة إلى 225 درجة بالإضافة إلى هياكل الدعم , مقطع كامل العينة يظهر في الشكل (c)(1.8.2) حيث تم استحصاله بواسطة الماسح الضوئي المسطح وتم ترشيح الضوضاء (التشويش على النتائج)، وبهذه الطريقة يمكن معالجة البيانات النظيفة بواسطة كشف الحواف حيث توفر خوارزمية Canny نتائج جيدة كما هو موضح في الشكل (e)(2.8.2). ثم يمكن معالجة البيانات عن طريق تحويل كل بيكسل أبيض ثنائي البعد لموضعه.

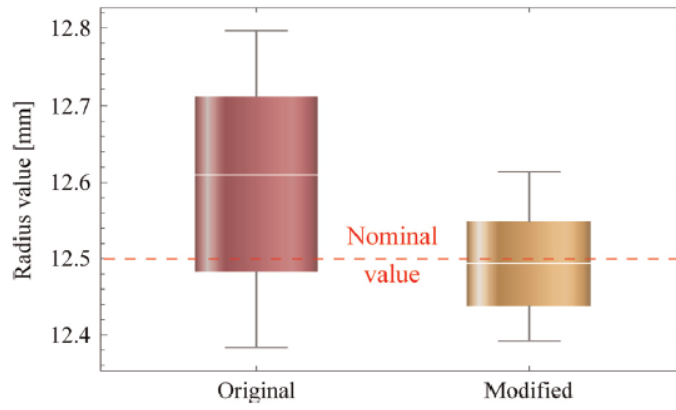


الشكل (2.8.2) دراسة حالة الاسطوانة[8].

إن الشكل الناتج عبارة عن دائرة وتمّ نقل البيانات التجريبية وفقاً للإحداثيات المركزية التي تمّ العثور عليها بواسطة الانحدار. ويوضح الشكل (a)(3.8.2) محاذاة مرضية للبيانات (الأصل باللون الأزرق وتعديلها باللون الأحمر) فيما يتعلق بالأبعاد الاسمية (الخط الأسود المنقطع).. ومن خلال تكبير المناطق المثبتة يمكن القيام ببعض الاعتبارات المثيرة للاهتمام. يوضح الشكل (b)(3.8.2) تكبير الجدران الأفقية القريبة، حيث توفر شعيرات المادة المنصهرة سلوكاً غير منتظم للسطح المكبر مع تفاوت متغير يعتمد على زاوية الترسيب. ونلاحظ تباعد عن القيمة الاسمية بمقدار 0.2 mm وهذه النتيجة مرضية تماماً. كما تمّ تطبيق نفس الإزاحة على الجدران الأفقية في الجزء السفلي من القسم ، أي زاوية الترسيب بالقرب من 180 درجة (الشكل (c)(3.8.2))، في هذه الحالة أيضاً محاذاة جيدة بين التشكيل الجانبي المعدل والحدود الاسمية. بالنسبة للجدران الرأسية القريبة ، تقترب الإزاحة من الصفر ، ويؤكد الشكل (d)(3.8.2) أن كلا من الحدود الأصلية والمعدلة قريبة جداً من تلك الاسمية.

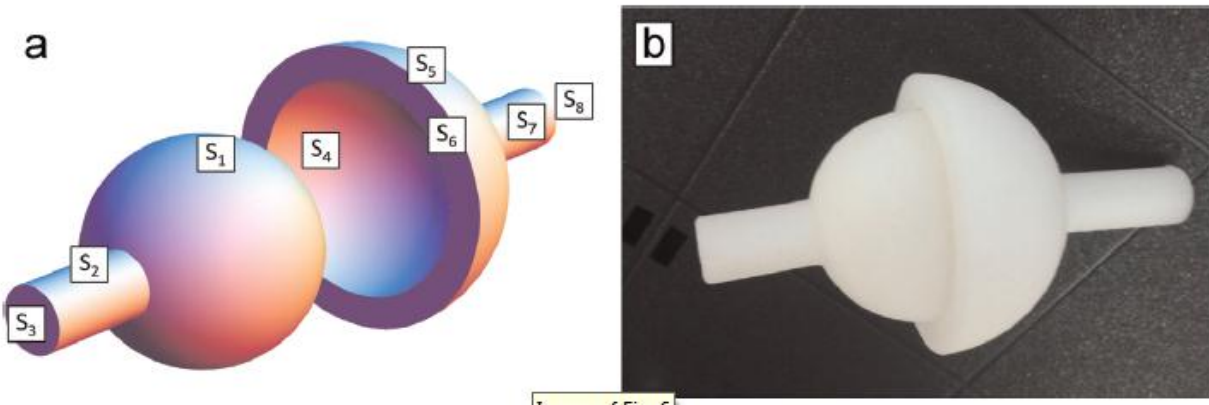


وبين الشكل (4.8.2) المخطط الصندوقي لكل من القيم الأصلية و المعدلة حيث يلاحظ أنها تنتمي للتوزيع الطبيعي و نلاحظ كيف انخفض المتوسط من 12.61 للأصلية إلى 12.49 للمعدلة و هذا قريب جدا من القيم الاسمية [8].



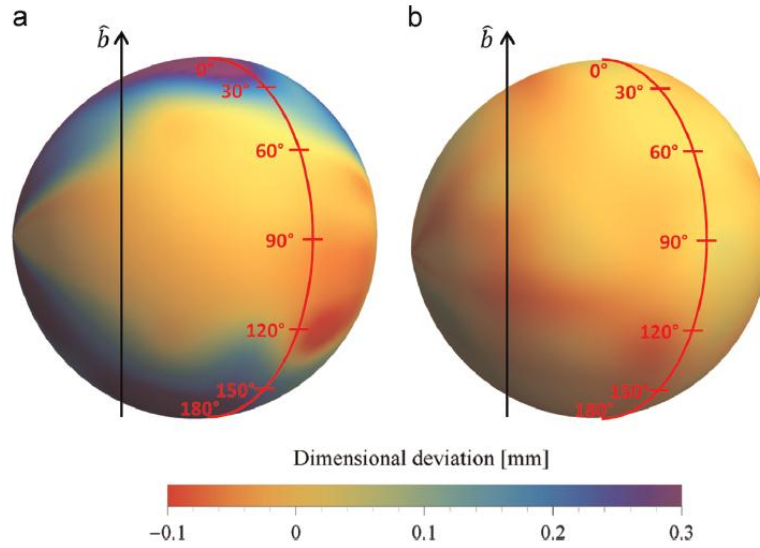
الشكل ( 4.8.2 ) المخطط الصندوقي لكل من القيم الاصلية و المعدلة [8].

دراسة المفصل الكروي: دراسة الحالة الثانية هي مفصل فيزيائي ويتكون من عنصرين ، كما هو مذكور في الشكل 6a: عمود مع كرة وتجويف والمؤلف من ثمانية أوجه S1 حتى S8 بينما يبين الشكل 6b المفصل الكروي الأصلي بأبعاده الحقيقية.



الشكل ( 5.8.2 ) المفصل الكروي [8].

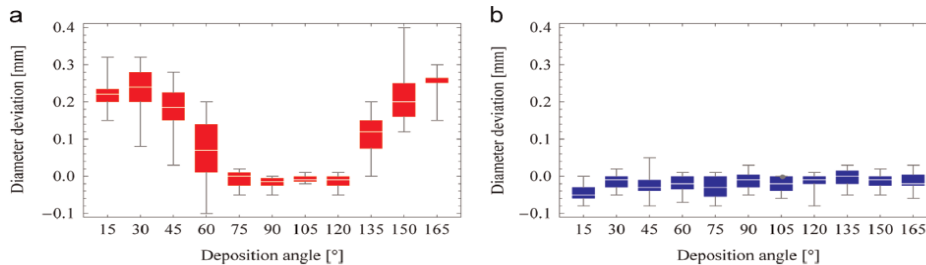
تتألف عملية رسم الخرائط باستخدام ميكرومتر من 187 قياسات للقطر موزعة بشكل موحد على سطح الكرة بأكملها. تمّت معالجة البيانات من أجل تحقيق الانحرافات عن القيمة الاسمية لقطر الكرة . في الشكل ( 6.8.2 ) يظهر التمثيل الثلاثي الأبعاد للنتائج .



الشكل (6.8.2) التمثيل الثلاثي الأبعاد للناتج [8].

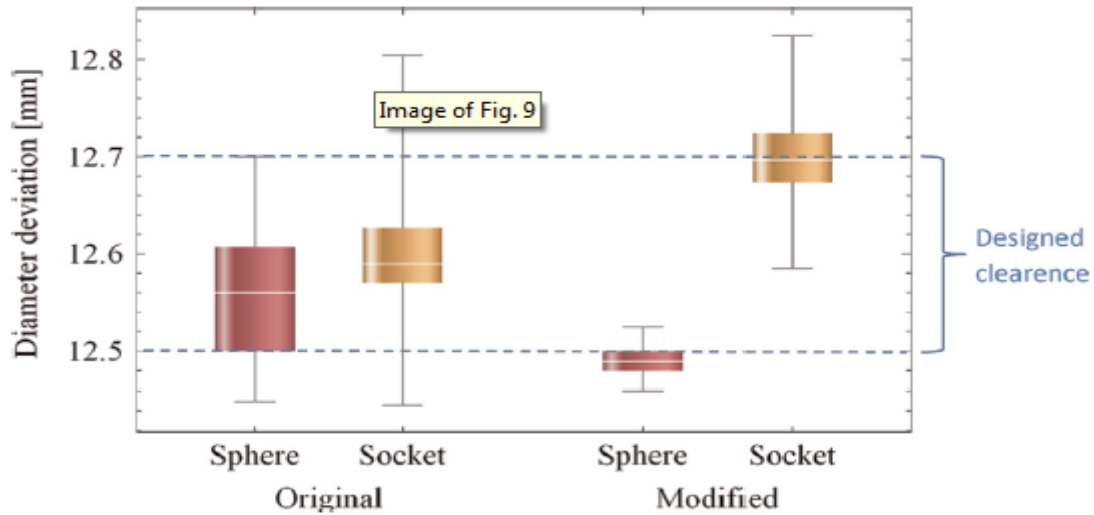
يتطابق قطر العينة الأصلية (الشكل (a) (6.8.2)) مع القيمة الاسمية فقط للأسطح التي لها زاوية ترسيب قريبة من 90 درجة. في مكان آخر تزيد الانحرافات عن 0.3 مم. بعد تطبيق سوق دبي المالي (DFM)، تكون الخريطة الناتجة (الشكل (b) (6.8.2)) موحدة بشكل ملحوظ: حيث تكون الانحرافات قريبة من القيمة الاسمية مع انحرافات بسيطة متناثرة من فئة 0.05 مم.

ومن أجل تحليل العلاقة بين الانحرافات وزاوية الترسيب، قبل تطبيق المنهجية (DFM) وبعدها، تم إنشاء المخطط الصندوقي لهذه البيانات، حيث نلاحظ من الشكل (a) (7.8.2) كيف أن قيم متوسط الانحرافات للنموذج الأصلي تتباعد عن متوسط القيم الاسمية كلما ابتعدنا بقيم زاوية الترسيب عن الـ 90 درجة وكيف يزداد تبعثر هذه القيم في حين نجد من الشكل (b) (6.8.2) أن متوسط قيم الانحرافات بعد تطبيق (DFM) قريب جداً من القيم الاسمية وبالرغم من اختلاف هذه القيم فقد لا يتعدى انحرافها 0.05 مم.



الشكل (7.8.2) قيم الانحرافات للنموذج الأصلي والقيم الاسمية [8].

ويوضح الشكل (8.8.2) نتائج قياسات التجويف بالمقارنة مع الكرة. بالنسبة لهذه المناطق الداخلية ، فإن وجود هياكل الدعم يسبب بعض العيوب والتغيير في الشكل ، وبالتالي يكون الانحراف أكبر منه في المناطق الخارجية. ونلاحظ بعد تثبيت القيم الاسمية و رسم المخطط الصندوقي لقيم الانحرافات لكل من الكرة و التجويف كيف أصبح المتوسط قريب جدا بعد تطبيق منهجية DFM.



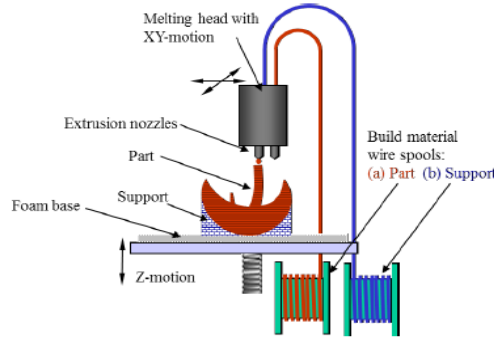
الشكل (8.8.2) نتائج قياسات التجويف بالمقارنة مع الكرة [8].

## 9.2. الدراسة التاسعة:

### Methods to Improve Surface Finish of Parts Produced by Fused Deposition Modeling

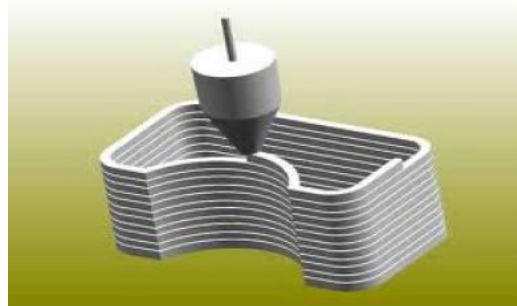
حيث قام الباحثون (Gurpal Singh Bual, Parladdkumar) بدراسة بعنوان طرق تحسين الإنهاء السطحي للطباعة بتقانة تشكيل الراسب المنصهر FDM (2014): [9] حيث بما أن تشكيل الراسب المنصهر (FDM) يعتبر إحدى تقنيات طباعة النماذج الأولية السريعة RP التي يمكنها استخدام المواد البلاستيكية ، والتي يمكن استخدامها بفعالية في توليد أنماط لصب مستثمر والذي بدوره يعتمد على الإنهاء السطحي للنموذج ، ولكن الإنهاء السطحي للأجزاء المنتجة باستخدام FDM ليست جيدة جدا بالمقارنة مع النماذج الشمعية. لذلك تم استخدام النماذج الناتجة عن المواد المتلدنة أو البلاستيكية بدلاً من الشمع ، حيث أنه يلزم استخدام تقانة لتحسين الإنهاء السطحي للأجزاء المنتجة ب FDM. وقد وجد أن هناك أساليب مختلفة لتحقيق هذا الهدف، وقد تم استعراض هذه الأساليب في هذه الدراسة.

تعتد تقانة FDM على رأس ذو فوهة ساخنة حاملة للمادة و ذات هندسية معينة, وتعتمد على مادتين مادة للبناء (مواد بلاستيكية أو شمعية) ومادة دعم, وتتحرك في اتجاهين رئيسيين على الطاولة التي يمكن رفعها و خفضها من أجل طباعة الطبقة تلو الطبقة والتي تتماسك كل منها مع سابقتها حتى يكتمل بناء النموذج المطلوب و يتم البناء مع الهياكل الداعمة و التي يمكن فصلها عن النموذج فيما بعد, ويبين الشكل (1.9.2) المخطط التكنولوجي لعملية FDM .



الشكل (1.9.2) المخطط التكنولوجي لعملية FDM [9].

وتستخدم مادة ABS المشابهة للشمع في خواصها في دراسة الإنهاء السطحي حيث يكون نموذج ال ABS مرتبطا بمدخل الشمع ويتم الصب في قالب سيراميكي للحصول على الصب المطلوب. الانتهاء السطحي أمر حيوي في الصب, لذلك, لإنتاج المسبوكات ذات السطح الجيد, يجب أن يكون النمط الرئيسي من FDM ذو سطح جيد. ولكن في عملية FDM, وجد أن السطح النهائي للأجزاء المنتجة أقل شأنا مقارنة بالشمع وبعض تقنيات RP الأخرى. ويرجع ذلك إلى تصميم العملية التي تملأها سماكة الشريط المنصهر. الشكل (2.9.2) يبين تشكل الطبقات و بقائها مرئية.



الشكل (2.9.2) تشكل الطبقات و بقائها مرئية [9].

و لتحقيق صبب مستثمر و انتهاء سطحي عالي هنالك العديد من الدراسات التي جرت في هذا السياق و هي تختلف بإجابياتها ولذلك فإنها تحتاج الى تصنيف وهذا هو الهدف من هذا البحث, لذلك فإن تصنيف هذه الدراسات ينقسم وفق أربعة نواحي وهي:

### اتجاه البناء الأمثل :

إن اتجاه بداية البناء يعتبر من العوامل الهامة المؤثرة على جودة الانتهاء السطحي, وهناك العديد من الدراسات التي قامت بالتحقق من هذه النقطة وأبرزها ( Vijay et al ) حيث قامت بتحديد الإنهاء السطحي الأمثل للنموذج الذي تمّ بناؤه عن طريق تغيير اتجاه البناء ، وسمك الطبقة والحفاظ على ثبات العوامل الأخرى لعملية FDM. وتمّ إجراء التجارب مع مستويين لسمك الطبقة وثلاثة مستويات لعامل التوجيه. وخلص الباحثون إلى أنه بالنسبة للتوجيه المبني على 20 و 45 درجة ، فإن قيمة الخشونة تتناسب طردياً مع سماكة الطبقة ولكن بالنسبة لقيمة خشونة التوجيه 70 درجة ، تنخفض القيمة كلما زاد سمك الطبقة.

أما بالنسبة ل Allen & Dutta فقد طور المؤلفون طريقة لتحديد الاتجاه الأمثل على أساس سمك الشرائح المتغير في التصنيع متعدد الطبقات لجسم متعدد الوجوه.

أما بالنسبة ل Lan et al فقد تمّ تحديد اتجاه الترسيب لأجزاء الطباعة الفراغية المستندة إلى اعتبارات جودة السطح ، ووقت البناء وتعقيد هياكل الدعم. وناقش المؤلف مشكلة التوجيه من وجهة النظر الهندسية والخوارزمية ، ووضع معايير القرار لتحديد الاتجاه الأمثل لزاوية الترسيب

أما Pham et al فقد طورت نظاماً لتوجيه نماذج CAD للجزء المترسب في الطباعة الحجرية للحصول على أفضل اتجاه مع مراعاة وقت البناء والتكلفة والدقة.

### استراتيجية الشرائح:

بشكل عام, إن الطبقة الرقيقة تحسن من الإنهاء السطحي و لكنها تزيد من زمن البناء, لذا وجد العديد من الباحثين أن سمك الطبقة يؤثر بشكل كبير على السطح.

قام (Vasudevarao) بدراسة تأثير البرامترات مثل اتجاه البناء ، سمك الطبقة ، عرض الشريط ، الفجوة الهوائية ودرجة حرارة النموذج عند الانتهاء. وتمّ إجراء التجارب بمستويين لكل عامل تمّ اقتراحه.

وقد خلص الباحثون إلى أن سماكة الطبقة و اتجاه البناء قد أثبتت أنها عوامل مهمة في تحديد جودة السطح للجزء. ويتم الحصول على أفضل تشطيب للسطح مع سمك طبقة 0.070 واتجاه 70 درجة.

كما قام Bakar et al بدراسة تأثير ثلاث برامترات للعملية مثل سماكة الطبقة وعرض الشريط والمسح الطبقي الداخلي. و أجريت التجارب على نموذج اختبار يحتوي على مجموعة متنوعة من الأشكال والأحجام الهندسية مثل الفتحات والاسطوانات والمكعبات والحلقات التي تتوفر عادة على شكل قطع بلاستيكية. وخلص الباحثون إلى أن أفضل بعد الذي سيتم بناؤه مع FDM في اتجاهات x ، y هو 2 مم وما فوقها. علاوة على ذلك ، أوصى المؤلفون باستخدام قيم مناسبة لعرض الشريط والمسح الطبقي الداخلي بالإضافة إلى تطبيق طبقة رقيقة ونهاية سطحية ظاهرية واضحة أثناء عمل الأجزاء الصغيرة. وأظهرت الدراسة أن كلاً من هذه البرامترات يمكن أن يساعد في جودة الترابط بين الطبقات ويؤدي إلى إنهاء سطح أفضل.

#### برامترات التصنيع المثلى :

في دراسة Zhou أشار إلى أن سرعة التصنيع ودقة النموذج هي المتطلبات الوظيفية الأساسية للطباعة السريعة RP. ومع ذلك ، تتأثر هذه المتطلبات ببرامترات المعالجة المحددة من قبل المستخدم. وتشمل العوامل المؤثرة على دقة أجزاء RP وتنسيق ملف STL وخصائص المادة وبرامترات المعالجة اللاحقة. وكشف الباحثون أنه على الرغم من أن المستخدمين يمكنهم فقط ضبط هذه البرامترات ، فإن هذه التعديلات الصغيرة ذات قيمة كبيرة لتحسين دقة المنتج.

أما Lee تستخدم طريقة Taguchi ببرامترات العملية المثلى لآلة النماذج الأولية السريعة (FDM) التي تم استخدامها لإنتاج النموذج الأولي لـ ABS. في هذه الدراسة ، حصل الباحثون على برامترات عملية مثالية لعملية FDM وبرامترات العملية الرئيسية التي تؤثر على أداء النموذج الأولي. أجريت التجارب للتأكد من فعالية هذا النهج ومن النتائج وجد أن معاملات FDM ، أي سمك الطبقة ، وزاوية خطوط المسح وفجوة الهواء تؤثر بشكل كبير على الأداء المرين لنموذج المصنع من ال ABS .

#### مرحلة ما بعد المعالجة:

على الرغم من كل التقنيات مثل إستراتيجية الشرائح الرقيقة ، والاتجاه الأمثل والتحسين البارامتري ، فإنه قد لا يكون من الممكن تحقيق السطح المطلوب ضمن تقانة ال FDM. لذلك ، قد تكون هناك

حاجة لمرحلة مابعد العلاج قبل استخدام هذه النماذج. وهناك عدة دراسات مختلفة تتعلق بما بعد معالجة أجزاء FDM من أجل زيادة الإنهاء السطحي أبرزها:

دراسة قام بها Pandey لفحص استخدام آلات القطع الساخنة لتحسين إنهاء سطح أجزاء FDM. وتمّ استخدام آلات القطع الساخنة لإزالة مواد الأجزاء المصممة. وتمّ إجراء التجارب بمستويين وأربعة متغيرات عملية مثل زاوية إشعال اللهب للقاطع ، سرعة القطع ، واتجاه القطع مع مراعاة اتجاه الطبقات والبناء. وتمّ استنتاج أن طريقة التجهيز المقترحة قادرة على إنتاج السطح النهائي برتبة 0.3 ميكرومتر مع مستوى ثقة 87%. كما وجد أنه يمكن استخدام آلات القطع الساخنة للحصول على سطح أفضل ضمن الFDM.

دراسة قام بها Percoco حيث قام بالتحقيق في تأثير العلاج الكيميائي على قوة الانضغاط وخشونة السطح من أجزاء FDM مع حل 90 % من ثنائي ميثيل الكيتون و 10 % من الماء. وأسفرت الدراسة عن زيادة في قوة الانضغاط. وخلص الباحثون إلى أن معاملات الإنهاء السطحي المقترح التي يمكن استخدامها مع أوقات غمر تصل إلى 300 ثانية تمّ تقليل الخشونة بنسبة تصل إلى 90% ، مما يحسن الخصائص الميكانيكية في بعض الحالات أفضل من تلك الموجودة في الأجزاء غير المعالجة.

### النتائج:

نجد أن في هذا الفصل تمّت مراجعة الدراسات المتعلقة بمختلف تقنيات الإنهاء السطحي. وقد وجد أن هناك أساليب مختلفة لتحسين الإنهاء السطحي للأجزاء المصنعة بتقانة FDM. كما يمكن تحسين تشطيب السطح عن طريق اختيار اتجاه بناء مناسب للجزء. كما يمكن زيادته عن طريق تقليل سماكة طبقة مادة البناء على الرغم من أنه سيزيد من وقت البناء. كما أفاد بعض المؤلفين أن الإعداد الصحيح لبرامترات آلة FDM قد يؤدي إلى إنهاء سطح أفضل. وقد وجد أنه يمكن أيضاً الإنهاء السطحي باستخدام بعض تقنيات المعالجة اللاحقة مثل الاستعانة بآلات القطع الحراري أو استخدام العلاج الكيميائي يمكن أن يساعد في إنتاج سطح جيد جداً.

## الفصل الثالث

### ترسيب الجزء المثالي في نمذجة الراسب المنصهر

#### 1.3. توجه ترسيب الجزء المثالي في نمذجة الراسب المنصهر :

النهاية السطحية وزمن الترسيب الجزئي هما شيئان مهمان في النمذجة السريعة (RP) , حيث يكونان متعاكسين , عموما يجب الوصول إلى حل وسطي بين السمتين اللتين تخصان النماذج في RP , يمكن التوصل إلى حل وسطي بين هاتين القضيتين المتناقضتين باستعمال مخطط شرائحي التلاؤمية , على أي حال اختيار اتجاه الترسيب الجزئي المناسب سيوفر حلاً أفضل [10] .

نحاول في دراستنا الحالية الحصول على اتجاه الترسيب الجزئي المثالي في عملية نمذجة الراسب المنصهر لتحسين النهاية السطحية للجزء , وتقليل زمن التصنيع .

تطورت النماذج المستخدمة لتقييم متوسط خشونة السطح وزمن التصنيع, فتستعمل خوارزمية ذات رموز حقيقية للحصول على الحل المثالي . حيث تتوافق التنبؤات في النهج الحالي مع النتائج السابقة , و يمكن أن يستعمل المنهج المقترح للحصول على اتجاه الترسيب المثالي لأي مكون من دون اختيار الاتجاه الأفضل .

### 1.1.3. المقدمة :

النمذجة السريعة (RP) هي العملية التي ينتج فيها الجزء باستعمال طبقة ترسيب تلو الطبقة من المادة , وهي تقانة ضرورية حيث إنها تخفض زمن التصنيع للمنتج حتى % 30 - 50 حتى إذا كان الجزء النسبي معقدا جدا (1, 2) . تتألف دورة RP من تشكيل نموذج هندسي باستعمال برنامج SOLID , و تحديد اتجاه الترسيب المناسب , و التقطيع , وتوليد طرق لترسيب المواد , والترسيب الجزئي , ثم عمليات المعالجة .

تكون معظم الخطوات في RP آلية , على أي حال يتم اختيار اتجاه الترسيب الجزئي بشكل يدوي بين بضعة خيارات موضحة من قبل برامج RP . لاتجاه الترسيب الجزئي في برنامج ماكينة RP تأثير مهم على العديد من الخواص التي تحدد الجودة النهائية وتكلفة النموذج (3) .

تقوم عملية أتمتة اختيار الاتجاه بإزالة تعقيد المشغل, و لذلك فهو يخفض الأخطاء المحتملة .

اختيار اتجاه الترسيب الجزئي المثالي هو عامل مهم جدا حيث إنه يؤثر في زمن التصنيع , والبنية الداعمة , ودقة الأبعاد , والنهاية السطحية , وتكلفة النموذج .

تحدد عدد من العمليات البارامترات و القيود التي يجب أن نأخذها في الحسبان عند اتخاذ القرار . فمن الصعب تحديد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي , وزمن المهمة, كما يجب المبادلة بين الخواص المتعاكسة المختلفة , مثل النهاية السطحية, وزمن التصنيع .

هناك عدة محاولات ( 3-5 , 7-13 , 15 , 16 ) لتحديد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي لخواص مختلفة, مثل : الدقة , وزمن التصنيع , والبنية الداعمة ....

حدد العالم ألكسندر دقة و اتجاه الترسيب الجزئي وتكلفته , و تمت زيادة الدقة السطحية من خلال تخفيض ارتفاع النتوء الوسطي . كما تم وضع تكلفة النماذج ( SL ) و نمذجة الراسب المنصهر ( FDM ) حيث تم تخمين تكلفة المكونات من أجل اتجاهات مختلفة , يحدد الاتجاه المناسب لأحد الخواص من لائحة الخطط الأساسية المعطاة مسبقاً .

طور العالمان فرانك و فاديل نظاما تفاعليا لتحديد اتجاه الترسيب الجزئي المناسب . حيث يعد كلا من النهاية السطحية , وزمن التصنيع , أو البنية الداعمة كخواص وتم وضع التعليمات لتحديد الاتجاه المناسب .

قدم العالم شينغ نظرة عن تحديد اتجاه الترسيب الجزئي المناسب مع الأخذ في الحسبان أن دقة الأبعاد وزمن التصنيع هما خاصتان , تم اعتبار الدقة الجزئية كخاصة مؤقتة, وتم حسابها بالاعتماد على التجربة على أنواع مختلفة من السطوح . حيث إن الخواص الثانوية تقوم بتخفيض زمن التصنيع ويتم تحقيقها بتخفيض عدد الشرائح . وتم أيضا إدخال شرائح لها ارتفاع النتوء المحدد مسبقا في عملها أيضا , تم تمييز الخطوات الأساسية المحتملة بإيجاد السطوح المستوية للجسم حيث كانت تخضع بضعة اتجاهات كانت تخضع لاعتبارات الدقة , ولاحقا تم اختيار واحد أو اثنين من الاتجاهات بتخفيض زمن التصنيع .

حدد العالم لان اتجاه الترسيب الجزئي بالاعتماد على اعتبارات جودة السطح , وزمن التصنيع , أو تعقيد البنية الداعمة , حيث يتم تقدير جودة السطح إما بزيادة مساحة سطوح المناطق سيئة الجودة أو تخفيضها . تم تقدير زمن التصنيع بشكل مباشر بواسطة ارتفاع الجزء في اتجاه الترسيب , ويتم تقليص البنية الداعمة بتخفيض عدد النقاط المدعومة , ويتحدد الاتجاه المناسب لهدف ما من لائحة الخطط الأساسية المختارة مسبقا .

كان للعالم راتان ونغ نظرة عن الخطأ الحجمي, حيث وجد أن الاختلاف في حجم الجزء المعزول و برنامج كاد ينخفض لإيجاد الاتجاه المناسب , يحسب حجم الجزء الراسب بافتراض حواف الشريحة. كما في المستطيل .

اقترح العلماء الاتجاه الأفضل الذي يعطي عددا أقل من الشرائح بين بضعة اتجاهات مختارة مسبقاً.

طوّر العلماء نظاماً لاتجاه نماذج كاد من أجل الترسيب الجزئي, للحصول على أفضل مبادلة بين زمن التصنيع , والتكلفة , والدقة . الأداة هنا هي نظام أساسي مميز والتي تأخذ في الحسبان التكلفة , زمن التصنيع , والميزات المعقدة , وميزات المنحى المثالية , والمساحات المهددة حجم الدعم للوصول إلى منحى التصنيع . والنظام هنا لديه ست وحدات هي : وحدة التوجيه , ووحدة الدعم , ووحدة التوقيت , ووحدة التكلفة , ووحدة الميزات المعقدة , ووحدة العرض . حيث يتم اختيار الاتجاهات المحتملة أولاً في وحدة التوجيه المعتمدة على السطوح الحرجة , والنقوب , والقطوع , والأعمدة , و النتوءات , والمحاور . كما يتم الحصول على توصيات ل اتجاه الترشيح المختار مسبقاً من أجل الترسيب الجزئي .

على أي حال قد يكون هناك اتجاه الترسيب الجزئي أفضل من منحى الترشيح المختار مسبقاً .

طوّر العالم وست طريقة تخطيط للعملية من أجل تحسين الأداء عند التصنيع . (أي زمن تصنيع أقل , ودقة أفضل , ونهاية سطحية جيدة , حيث يتم تخطيط العملية بواسطتهم بثلاث خطوات وهي : وحدات التوجيهات , والتقطيع , ووحدات البارامتر .

إن لكل من اتجاه الترسيب الجزئي , وسماكة الطبقة , وفترة التفتيش , والارتفاع  $z$  , ومعالجة كافية , فتحة كافية هي متغيرات العملية الستة التي تم اتخاذها باستعمال البنية الداعمة و خطط كالقيود, حيث تمّ تطوير وحدة اتجاه الترسيب الجزئي بواسطتهم , فهي تعمل على تقييم مجموعة الاتجاهات المعتمدة

على السطوح الأسطوانية والمخروطية والمستوية في الجزء . يتم توجيه الجزء في هذه التوجيهات المختارة مسبقاً، و يتم تقطيعها بشكل متساوٍ ليتم التبادل بين الأهداف الثلاثة السابقة . تم اختيار أكثر أربع اتجاهات بديلة عملية من أجل التحقق في التقطيع و وحدات البارامتر، للحصول على تخطيط العملية الأنسب في النهاية .

قدّم العلماء طريقة تقطيع مشابهة KULKARNI و DUTTA تقطع وحدات كاد الممثلة بالسطوح التحليلية . إن الاختلاف الأساسي بين المخططين أن XU يستعمل الخوارزميات الهندسية ( GA ) بينما Kulkarni و Dutta يستعملان برمجة خطية من الدرجة الثانية SQP ( ) لإيجاد سماكة الطبقة عند  $Z(u, v)$  . كما أوجد XU أيضاً أن اتجاه الترسيب الأفضل لأجزاء SL بين الاتجاهات المختارة مسبقاً من أجل زمن التصنيع ، والدقة ، واستقرار الجزء ، تعدّ معايير .

بالمبادلة بين قيم الدالة الموضوعية تم اختيار الاتجاه الأفضل .

طوّر العلماء نماذج لتوقع زمن التصنيع ، والدقة ، والنهاية السطحية لأجزاء SL باستعمال مبدأ رد فعل السطح ، وقد تمّ استعمال تقانة البرمجة لتحديد منحى الترسيب .

### 2.1.3. قضية التشكيل :

يمكن تقليل زمن التصنيع للنموذج بواسطة عزله بطبقات أسمك ، على أي حال هذا يؤدي إلى سطح أقسى ، بينما يزيد العزل باستخدام طبقات رقيقة زمن التصنيع كثيراً ، نجد هنا أن متوسط القساوة السطحية الجزئية، و زمن التصنيع للجزء يتم عدّهما كمتغيرين ويتم تقليلها بتخفيض مجموع وزنهما ، نوضح قضية التشكيل فيما يأتي :

### 1.2.1.3. متوسط القساوة السطحية الجزئية للنموذج :

#### 1- نموذج القساوة السطحية :

عدّ العالم Pandey أن سماكة الطبقة واتجاه التصنيع هما متغيرا العملية الأهم التي تؤثر في النهاية السطحية .

لدراسة القساوة السطحية للسطح الجزئي المعالج FDM فإنه يتم تصنيع جزء باتجاه تصنيع مختلف (الزاوية بين مماس السطح و الاتجاه العمودي, كما هو مبين في الشكل (1.1.3) )

بواسطة ماكينة FDM – 1650 حيث سماكة الشريحة 0,254 mm , ودرجة حرارة الجزء الكيميائي المنصهر 270 c , بمعنى آخر : ABS , 265 c درجة حرارة المادة الداعمة , 70 c درجة حرارة الغلاف وفجوة الهواء تكون صفراً . تم قياس قيم القساوة السطحية لسطوح مختلفة باستخدام مقياس السطوح 5000 . لوحظ أنه يوجد فتحة بين مسارات الترسيب إذا كانت اتجاهات التصنيع بين 90c , 70 c , على أي حال نحن لا نلاحظ أي فتحة في المسارات ضمن مجال اتجاهات التصنيع 0 – 70 c .

تتطلب السطوح الجانبية المثالية أكثر من 2 mm كطول للعينة من أجل اتجاهات التصنيع 70, 45 كما هو مبين في (الشكل 2) . في الشكل ( 2a ) يكون (  $\theta = 45$  ) حيث ليس هناك فتحة بين مسارات الترسيب , بينما هناك فتحة بين مسارات الترسيب عند (  $\theta = 70$  ) كما هو مبين في الشكل ( 2b ) (1.1.3) حيث ان  $\theta$  هي اتجاه التصنيع , يبين السطح الجانبي في الشكل ( 2b ) (1.1.3) بشكل

واضح ان شكل حواف السطوح الجانبية يكون تقريبا كقطع مكافئ . تم تطوير نموذج Stochastic ضمن المجال  $0 < \theta < 70^\circ$  بتقريب سطح الحافة الجانبي للطبقة كقطع مكافئ . تعطى القساوة السطحية بالعلاقة :

$$Ra(\mu m) = (69.28 - 72.36) \frac{t(mm)}{\cos(\theta)} \text{ for } 0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ \quad (1 - 2)$$

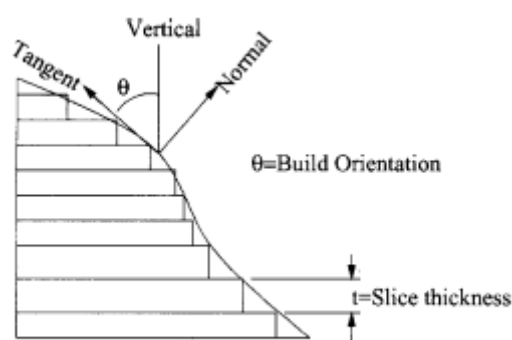
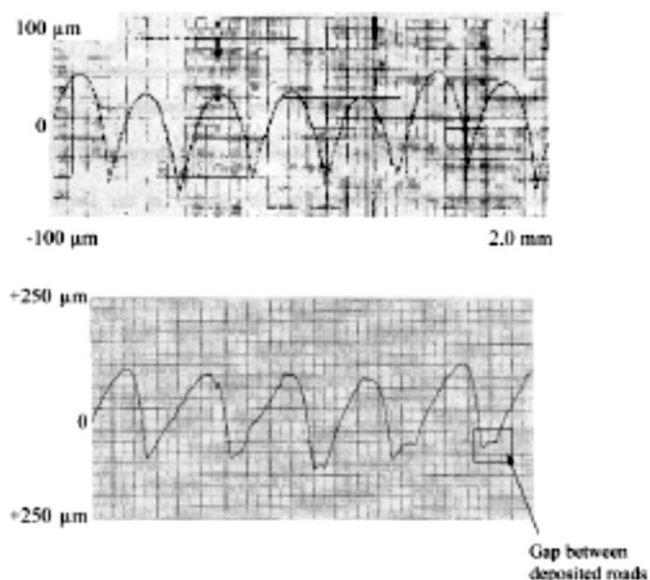


Fig. 1. Staircase effect in RP parts.



الشكل (1.1.3) شكل الحواف [11] .

السطح الجانبي عند  $\theta = 90^\circ$  ( السطح العمودي او الموازي ل FDM ) يكون بشكل دائري ( بدلا من قطع مكافئ ) حيث يكون الطول الأساسي  $t$  والارتفاع  $t * 0,5$  , تعطى قيمة القساوة السطحية من اجل  $\theta = 90^\circ$  بالعلاقة :

$$Ra(\mu m) = 112.6 \times t(mm) \text{ for } \theta = 90^\circ \quad (2 - 2)$$

يتم حساب القساوة السطحية ضمن المجال  $70 < \theta < 90$  باعتبار الاختلاف الخطي بين  $Ra_{70}$   $Ra_{90}$  , , بمعنى اخر :

$$Ra(\mu m) = \frac{1}{20} [90Ra_{70^\circ} - 70Ra_{90^\circ} + \theta(Ra_{90^\circ} - Ra_{70^\circ})] \text{ for } 70^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (3 - 2)$$

قاس العالم Pandey قيم القساوة السطحية للوجوه المدعمة ولاحظ انها تكون تقريبا 1,2 مرة من القساوة السطحية للسطح المقابل عند نفس اتجاه التصنيع , لذلك فان تأثير البنية الداعمة على جودة السطح تكون واحدة باعتبار ان القساوة السطحية لشبه المنحرف هي  $Ra_i * 1,2$  حيث :  $Ra_i$  هي القساوة السطحية لشبه المنحرف [11].

## 2- التقطيع التلاؤمي :

فيما سبق ( 3 , 23 , 14 , 6 ) يكون ارتفاع النتوء المحدد ( 32 , 23 , 14 , 6 ) وتفاوت المساحة المحدد ( 34 , 33 ) معياران يستعملان من قبل الباحثين لشرائح نموذج كاد , هذان المعياران لهما حدود كما لو انهما ليسا اجراءان قياسيان لجودة السطح .

تحسب سماكة الشريحة من العلاقة التالية :

$$t(mm) = \frac{Ra(\mu m) \times \cos(\theta)}{70.82} \quad (4 - 2)$$

حيث ان  $Ra$  هي القيمة الاعظمية للقساوة السطحية المسموح منها من الجزء , يتم حساب متوسط القساوة السطحية الجزئية باستعمال العلاقة التالية :

$$Ra_{av} = \frac{\sum Ra_i \times A_i}{\sum A_i} \quad (5 - 2)$$

حيث ان  $Ra_{av}$  هي متوسط القساوة السطحية للجزء ,  $Ra_i$  هي القساوة و  $A_i$  مساحة الشكل المثلثي لملف STL

### 3- زمن تصنيع النموذج :

ان التقدير الدقيق لزمن التصنيع من اجل الأجزاء المعالجة FDM يحتاج لتقطيع الجزء , و حساب مساحة الشرائح وتوليد مسارات لوضع المادة , حيث يتاثر زمن التصنيع بتسارع او تباطا النتوء اثناء ترسب المادة .

أزمنة عدم الإنتاج مثل وقت تقليل البرنامج بعد ترسب الطبقة , و الزمن بين بداية ونهاية المسار الخطي الجديد , و الوقت المستغرق اثناء مسح النتوء .

يكون زمن عدم الانتاج بين تجزئة النتوء و النتوء المدعم , حيث تكون المادة المدعمة قليلة الكثافة , من الصعب حساب زمن التصنيع ل FDM بشكل تقديري , في دراستنا الحالية يقوم منهج فعال وبسيط بتقييم زمن التصنيع المستعمل .

بحال  $V_p$  هو حجم الجزء ،  $a_n$  هي مساحة المقطع العرضي للنتوء ،  $T_p$  زمن التصنيع المثالي للنموذج بافتراض انه لا يوجد انقطاع اثناء عملية الترسيب (تُهمل أوقات عدم الإنتاج ثم يعتمد زمن التصنيع على اتجاه الترسيب الجزئي كما يلي :

$$V_p = a_n \times v_e \times T_p \quad (6 - 2)$$

حيث  $v_e$  هي سرعة الرمي ل ABS المنصهر ويكون مساوي لسرعة مسار المادة ، لذلك فانه من الواضح ان الاختلاف في زمن التصنيع للنموذج من اجل اتجاهات الترسيب المختلفة يكون بسبب أوقات عدم الإنتاج ، لذلك يجب ملاحظة ان حجم البنية الداعمة سيكون مختلفا أيضا من اجل اتجاهات مختلفة وانه سيزيد زمن التصنيع ، على أي حال فهو مهمل . في النهاية هدفنا هو تقليل زمن التصنيع ، تقليل البنية الداعمة مع تقليل أوقات عدم الإنتاج ، وهذا سيؤدي الى تقليل زمن التصنيع . يمكن تقليل أوقات عدم الإنتاج المختلفة بتقليل عدد الشرائح ، يحسب زمن التصنيع لنموذج FDM من العلاقة التالية :

$$T_e = N_t(1 + F \times d_s) \quad (7 - 2)$$

حيث ان  $T_e$  زمن التصنيع ،  $N_t$  عدد الشرائح ،  $d_s$  كثافة المادة الداعمة ،  $F$  نسبة الجوانب المدعمة لنموذج كاد الى مساحة الجزء الكلية ، لذلك فان المشكلة الأساسية لتحديد اتجاه الترسيب الجزئي هي مشكلة وحيدة وذلك بتخصيص الاوزان  $w_1$  و  $w_2$  كميتغيران أي :

$$\text{minimize } O = w_1 \times Ra_{AV} + w_1 \times T_e \quad (8 - 2)$$

حيث  $w_1$  و  $w_2$  هما دالتان موضوعتان حيث :

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (9 - 2)$$

اتجاه الترسيب المثالي الذي يتم تحديده يكون مثل Deas-I في متجه معروف وينتج ملف STL

من المطلوب هنا حساب الدالة الموضوعية من اجل اتجاهات مختلفة للجزء . ملف STL ( احداثيات القمم والموجهات الطبيعية ) المقابلة لاتجاه ما من الجزء (الدوران مثلا حول محور تعطى المتغيرات بالشعاع الموحد ( nx , ny , nz ) بالنسبة للزاوية  $\phi$  كما هو مبين في الشكل ( 3 ) ويتم حسابه كما يلي :

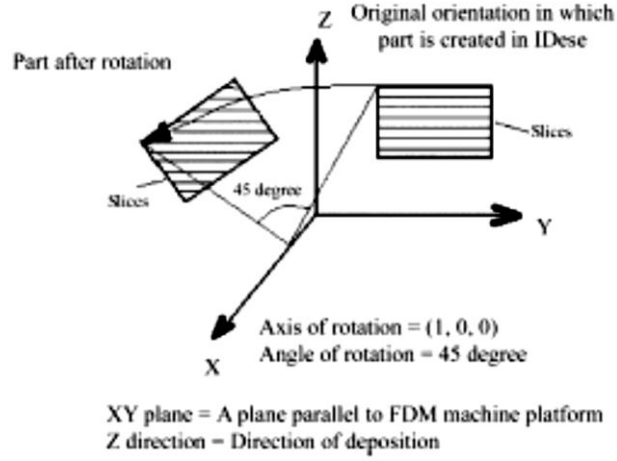
$$T_t = \begin{bmatrix} n_x^2 v\phi + c\phi & n_x n_y v\phi - n_z s\phi & n_x n_z v\phi + n_y s\phi \\ n_x n_y v\phi & n_y^2 v\phi + c\phi & n_y n_z v\phi - s\phi \\ n_x n_z v\phi & n_y n_z v\phi + n_z s\phi & n_z^2 v\phi + c\phi \end{bmatrix} (10 - 2)$$

حيث :  $c\phi = \cos\phi$  و  $v\phi = 1 - \cos\phi$  و  $s\phi = \sin\phi$ .

لذا لذلك فان المتغيرات هي الشعاع الموحد ( nx , ny , nz ) و الزاوية  $\phi$  .

### 3.1.3 . الحل :

تم حساب الدالتان الموضوعيتان السابقتان وتحويلهما الى دالة واحدة (باستخدام التجربة 8 ) عند متجهات مختلفة لنموذج كاد . حيث يتم استعمال خوارزمية رموز حقيقية لحل هذه المشكلة. في خوارزمية الرموز الحقيقية هذه و عند تنظيم المتغيرات المقررة في رموز حقيقية على خلاف الرموز الثنائية كما في حالة الخوارزمية ذات الرموز الثنائية , على أي حال فان الإجراءات الأخرى تكون متشابهة بين الخوارزميتين , تقوم المتغيرات المقررة في الاعداد الحقيقية بإزالة المشاكل المختلفة (مثل فضاء البحث المستمر , عدم الدقة في الحل , تحديد تخطيط المتغيرا ت...) التي تواجهنا عند استعمال الخوارزميات ثنائية الرموز .



الشكل (2.1.3) التدوير في برامج CAD [11].

ان استعمال الخوارزمية ذات الرموز الحقيقية مبرر هنا بينما هي تعتبر مشكلة بين كل الاتجاهات المحتملة . كما انه في نفس الوقت يؤثر تعقيد السطح على الحل كثيرا , في هذه المشاكل يمكن اعتقاد ان الدوال الرياضية التي تصف المتغير تستمر بالتغير مع تغير شكل الجزء . وهذه المشكلة تكون ذات عدة اشكال أيضا لذا يمكن معالجتها بشكل افضل باستعمال الخوارزمية بدلا من الميل المعتمد على التقنيات المثالية في خوارزمية الرموز الحقيقية .

يتم توليد شعاع المحور  $(n_x, n_y, n_z)$  وزاوية الدوران بشكل عشوائي بين الحدين المعطيان لاحقا .

$$\begin{cases} 0 \leq n_x \leq 1 \\ 0 \leq n_y \leq 1 \\ 0 \leq n_z \leq 1 \end{cases}$$

$$0 \leq \emptyset \leq 360^\circ \quad (11 - 2)$$

يصبح شعاع المحور  $(n_x, n_y, n_z)$  طبيعيا بتحويله الى شعاع موحد وذلك بتقسيمه بمقدار الشعاع

الموحد , تحسب قيمة الدالة الموضوعية  $O$  التي تستخدم قيم محددة للوزن  $W_1, W_2$

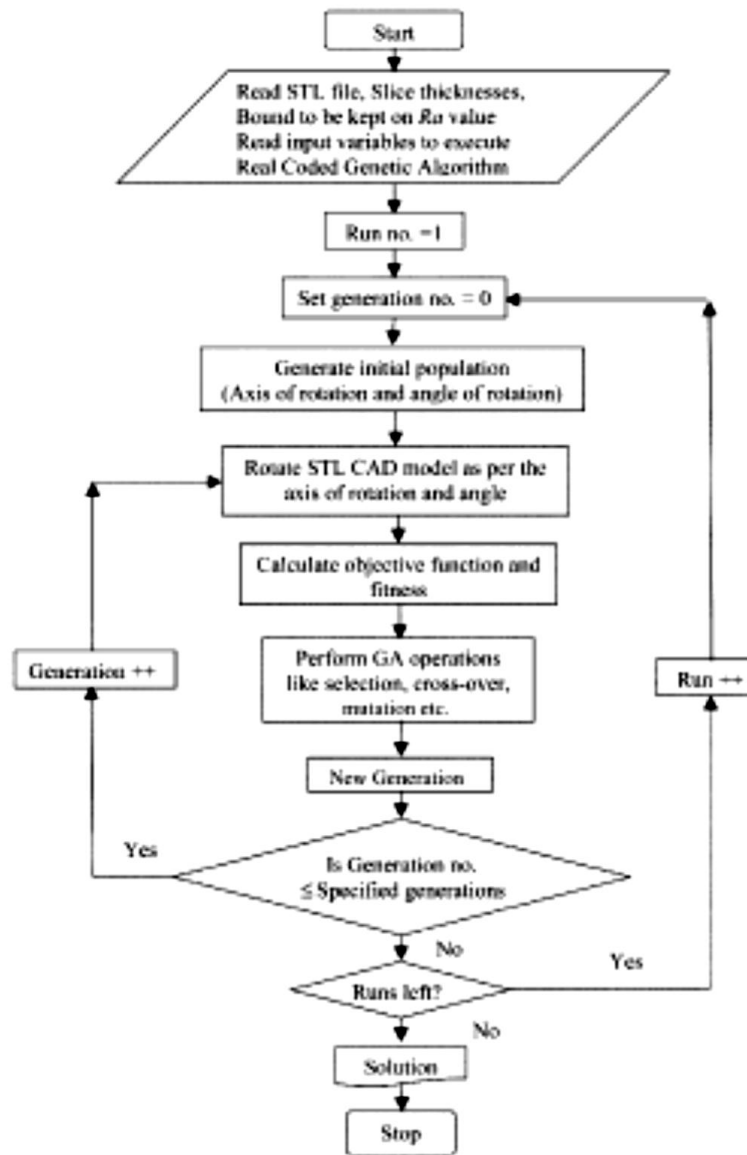
باستخدام التجربة ( 8 ) .

في السابق كان يتم حساب الدالتين الموضوعيتين ضمن التجارب ( 5 ) و ( 7 ) . نستخدم العامل المختار مع الضغط المختار في دراستنا هذه حيث يكون الضغط المختار هو نفسه عدد الحلول المقارنة بشكل عشوائي لانتاج ضعف عدد الحلول . يستعمل كل من محاكاة الانتقال الثنائي و مشغل التحول في اكثر من 75% واقل من 20% . حيث يتم تنفيذ هذا البرنامج من اجل عدد التوليدات المحددة وعدد المرات و عدد الحلول المثلى المكتسبة .

على أي حال هذه الطريقة تثبت بشكل حسابي انها غير مناسبة للاجزاء البسيطة . المدخلات الى النظام المطور هي ملف STL , سماكة الطبقة العظمى والصغرى , وحتمًا ستبقى Ra نفسها عند أي نقطة من الجزء و عند البارامترات المختلفة للخوارزمية .

يتم التحقق من الاجراء السابق بمقارنة تنبؤاته مع النتائج المتوفرة . الأمثلة التالية توضح قابلية النظام

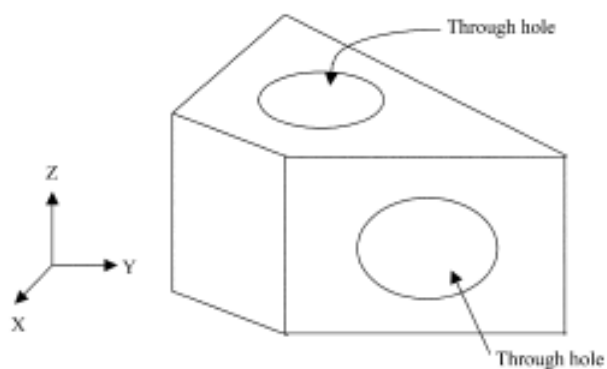
المطور :



الشكل (3.1.3) خوارزمية تطبيق الاجراء [11].

### 4.1.3 . النتائج والمناقشة :

يتم توليد نموذج صلب متكافئ الابعاد في Deas - I في نفس الاتجاه كما هو مبين في الشكل (4.1.3)



الشكل (4.1.3) نموذج صلب متكافئ الابعاد في Deas - I

الجدول (1.1.3) بيانات الدخل المتناظرة [11].

| FDM machine parameters/<br>others     | GA parameters                                       |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Minimum slice<br>thickness = 0.254 mm | No. of population = 50–100                          |
| Maximum slice<br>thickness = 1.27 mm  | No. of generations = 60–100                         |
| STL file                              | Distribution index for real<br>coded crossover = 20 |
| Bound on $R_d = 40 \mu\text{m}$       | Distribution index for real<br>coded mutation = 200 |
|                                       | Crossover probability = 0.8–0.9                     |
|                                       | Mutation probability = 0.05–0.2                     |
|                                       | Random seed value = 0.123                           |
|                                       | Number of runs = 5–10                               |

يستعمل ملف STL كمدخل الى النظام المطور . بارامترات الادخال الأخرى المختلفة المستعملة لتنفيذ

البرنامج تكون مبينة في الجدول (1.1.3) , يتم اختيار الاوزان  $W_1$  ,  $W_2$  لتكون 0 , 1 عند

تنفيذها من اجل زمن التصنيع فقط . يتطلب الحل المثالي بيانات دخل متناظرة المبينة في الجدول

(1.1.3) و ملف STL المبين في الجدول (2.1.3) .

من الجدول (2.1.3) نجد ان الأولوية إعطاء زمن التصنيع فقط (  $W1=0$  ,  $W2 =1$  ) ولا يوجد أولوية لجودة السطح , يبين الحل المقترح انه يمكن تدوير الجزء ب  $0,123 \approx 0$  حول المحور الممثل وفق شعاع الموقع (  $0,293 - 0,316 - 0,023$  ) , هذه النتيجة التي تشير ان المتجه المبين في الشكل (5.1.3) يوافق زمن التصنيع الاصغري . وهذا الحل يتوافق مع الحل المقترح من قبل Cheng .

### 5.1.3 . الأمثلة :

يتم تحديد الترسيب الجزئي المثالي للجزء الاكسيمومتري و الجزء ثلاثي الابعاد لكي تبين قابلية تطوير النظام . يبين الجزء الاكسيمومتري في الشكل 6 , باستعمال i- Deas و ملف STL . يستعمل STL كمدخل ليحدد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي , تبين بارامترات الدخول الأخرى المستعملة لتحديد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي في الجدول 1 , حيث هنا يتم استعمال 100 جيل مع 100 حجم , يبين الجدول (3.1.3) الحل الذي توصلنا اليه من هذا النظام عند قيم مختلفة للوزان  $W1$  ,  $W2$  في التجربة ( 8 ) , اتجاهات الترسيب الجزئية المثالية التي حصلنا عليها من اجل متوسط القساوة السطحية الاصغري و زمن التصنيع الاصغري المبينة في الشكل 7 .

في الشكل (6.1.3) يمثل XY المستوي الموازي ل ماكينة FDM , محور Z يمثل اتجاه العزل , اما اتجاه الترسيب الجزئي المثالي للجزء الثلاثي الابعاد فنجد في الشكل 8 , ويستعمل STL كمدخل لمتجه النظام ليحدد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي وهنا يتم تنفيذ البرنامج من اجل 60 جيل مع 100 حجم .

يبين الجدول (2.1.3) الحلول التي حصلنا عليها من النظام ذو الجزء الثلاثي البعاد عند قيم مختلفة

للاوزان  $W1$  ,  $W2$  في التجربة 8 , اتجاهات الترسيب الجزئية المثالية من اجل متوسط القساوة

السطحية الاصغري و زمن التصنيع الاصغري.

في الشكل (8.1.3) يمثل  $XY$  المستوي الموازي لماكينة FDM والمحور  $Z$  يمثل اتجاه الترسيب .

نجد من الجدول (2.1.3) , الجدول (3.1.3) , والاشكال , (8.1.3)(a) (6.1.3) (a) ومن اجل

$w1=1$  ,  $w2=0$  , ويتوافق هذا الحل مع الأداء 100% لجودة السطح فقط , ولا يوجد افضلية لزمن

التصنيع , وفي هذه الحالة يبين نظام التوجيه كيف تتحول سماكة الشريحة الى اصغر ما يمكن في

ماكينة  $RP$  ,

بنفس الوقت اذا كانت الأفضلية معطاة لزمن التصنيع الاصغري (  $W1=0$  ,  $W2=1$  ) فان نظام

التوجيه (الجدول 3, 4 والاشكال , (8.1.3)b(6.1.3)b ) يبين كيف تتحول سماكة الشريحة الى

اعظم ما يمكن في ماكينة  $RP$  في عملنا الحالي نجد ان النظام المطور يأخذ بعين الاعتبار كل من

زمن التصنيع الاصغري و متوسط القساوة السطحية بينما لا يأخذ بعين الاعتبار البنية الداعمة , لكن

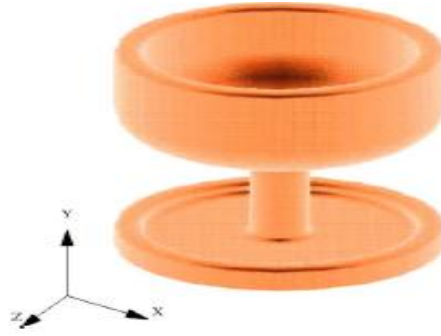
بسبب اخذ تاثير البنية الداعمة بعين الاعتبار في القساوة السطحية المقدرة و زمن التصنيع فان تحقيق

الحد الأدنى من البنية الداعمة يتحقق ضمنا , كما اننا نلاحظ انه يمكن تقليل الوقت الحسابي اذا ادخل

STL الخشن مكان STL الناعم واستعمل كمدخل الى النظام الحالي , وهذا لا يؤثر على الحل بشكل

ملحوظ ( يكون الاختلاف بين الحلين بسبب استخدام الخوارزمية ذات الرموز الحقيقية ) , على أي حال

يتم أيضا ملاحظة التغير في قيم الدالات الموضوعية .



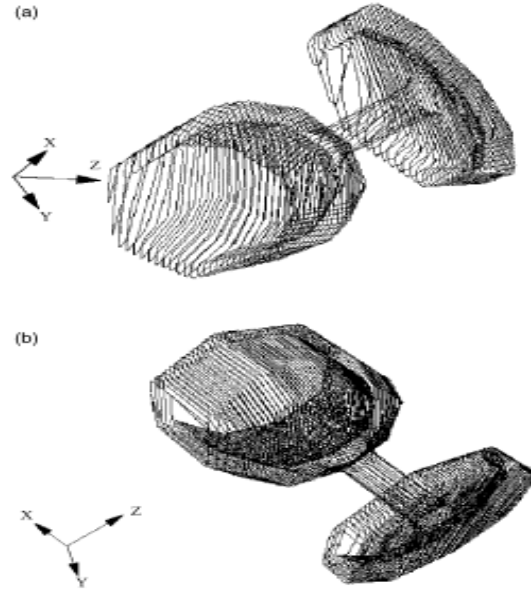
الشكل (5.1.3) الموديل الصلب للجزء الاكسيموميتري [11].

الجدول (2.1.3)الحل المثالي بيانات دخل متناظرة ملف STL

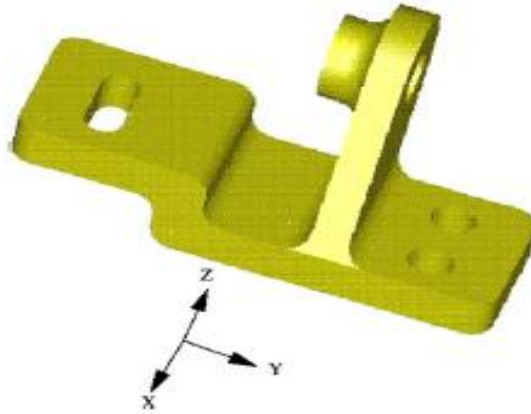
| Weights                 | $n_x$ | $n_y$ | $n_z$ | $\phi$<br>( $^{\circ}$ ) | $Ra_{av}$<br>( $\mu m$ ) | $T_e$ | $O$   |
|-------------------------|-------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|-------|-------|
| $w_1 = 0,$<br>$w_2 = 1$ | 0.023 | 0.316 | 0.293 | 0.132                    | 30.89                    | 12.87 | 12.87 |

الجدول (3.1.3)الحل الذي تم التوصل اليه عند قيم مختلفة لالوزان  $W_1$  ,  $W_2$

| Weights                       | $n_x$ | $n_y$ | $n_z$ | $\phi$<br>( $^{\circ}$ ) | $Ra_{av}$<br>( $\mu m$ ) | $T_e$  | $O$    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|--------|--------|
| $w_1 = 1,$<br>$w_2 = 0$       | 0.79  | 0.20  | 0.78  | 221.70                   | 25.29                    | 323.13 | 25.29  |
| $w_1 = 0.75,$<br>$w_2 = 0.25$ | 0.06  | 0.42  | 0.29  | 332.00                   | 34.21                    | 177.13 | 177.78 |
| $w_1 = 0.5,$<br>$w_2 = 0.5$   | 0.09  | 0.83  | 0.46  | 333.66                   | 35.83                    | 177.71 | 106.77 |
| $w_1 = 0.25,$<br>$w_2 = 0.75$ | 0.15  | 0.70  | 0.72  | 326.96                   | 35.64                    | 177.71 | 142.19 |
| $w_1 = 0,$<br>$w_2 = 1$       | 0.15  | 0.72  | 0.75  | 326.86                   | 35.41                    | 176.66 | 176.66 |



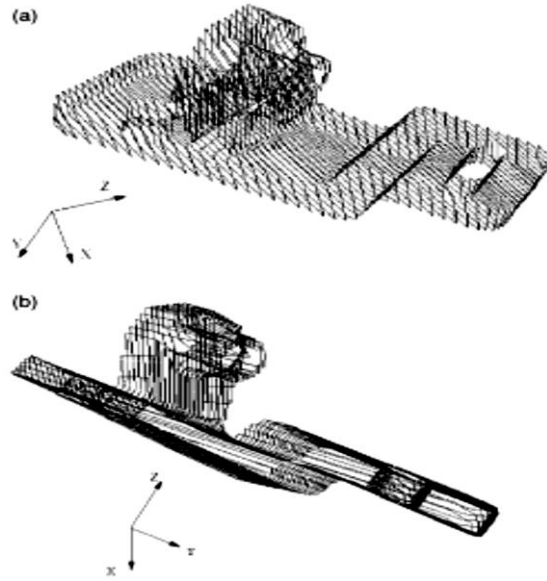
الشكل (6.1.3) اتجاهات الترسيب الجزئية المثالية للموديل الصلب



الشكل (7.1.3) الموديل الصلب لجزء ثلاثي الأبعاد

الجدول (3.1.3) الحل الذي تم التوصل اليه عند قيم مختلفة للوزان  $W_1$  ,  $W_2$  للجزء ثلاثي الأبعاد

| Weights                       | $n_x$ | $n_y$ | $n_z$ | $\phi$<br>( $^\circ$ ) | $Ra_{av}$<br>( $\mu m$ ) | $T_s$  | $O$    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|------------------------|--------------------------|--------|--------|
| $w_1 = 1,$<br>$w_2 = 0$       | 0.76  | 0.87  | 0.5   | 130.27                 | 21.72                    | 371.70 | 21.27  |
| $w_1 = 0.75,$<br>$w_2 = 0.25$ | 0.58  | 0.83  | 0.24  | 92.86                  | 30.1                     | 181.24 | 67.89  |
| $w_1 = 0.5,$<br>$w_2 = 0.5$   | 0.59  | 0.85  | 0.19  | 91.74                  | 31.02                    | 178.55 | 104.79 |
| $w_1 = 0.25,$<br>$w_2 = 0.75$ | 0.54  | 0.74  | 0.19  | 92.33                  | 30.29                    | 181.1  | 143.34 |
| $w_1 = 0,$<br>$w_2 = 1$       | 0.67  | 0.77  | 0.07  | 90.57                  | 31.01                    | 195.25 | 195.25 |



الشكل (8.1.3) اتجاهات الترسيب الجزئية المثالية للموديل الصلب لجزء ثلاثي الأبعاد

### 6.1.3 . الاستنتاجات :

في هذه الدراسة نحدد اتجاه الترسيب الجزئي المثالي لعملية FDM ,

المقداران المتناقضان زمن التصنيع و متوسط القساوة السطحية يتم تقليلهما بتقليل مجموع اوزانهما

يتم اخذ تأثير البنية الداعمة بعين الاعتبار في تقييم المقدارين , وهكذا تحقيق الحد الأدنى للبنية الداعمة يكون ضمن دراستنا ,

يستعمل التقطيع التلاؤمي بشكل اني في تحديد اتجاه الترسيب الجزئي , يتم التأكد من اعتبارات النظام

المطور باستعمال النتائج السابقة , يستخدم المنهج المقترح لتحديد اتجاه ترسيب الجزء لاي جزء معقد

مكون بشكل كامل .

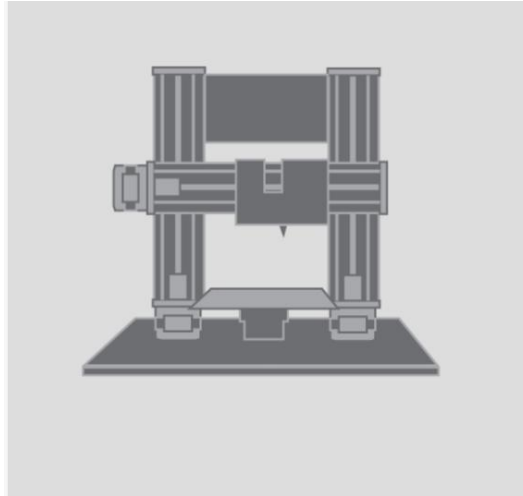
## الفصل الرابع

### تصميم وتصنيع الآلة وأدوات القياس

#### 1.4. مقدمة:

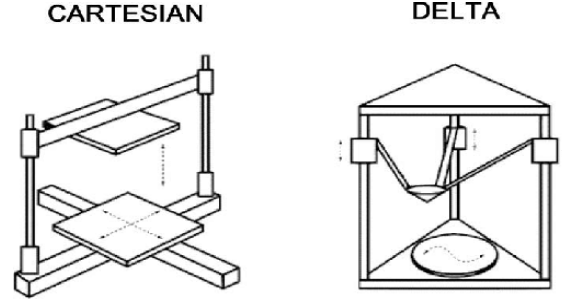
يعتمد مبدأ عمل آلة النمذجة بترسيب المصور FDM على ترسيب مصور المادة البوليميرية على شكل طبقات لتشكيل الجسم المطلوب. حيث يتم تحريك رأس البثق Nozzle Or Head ضمن مسار ثلاثي الأبعاد للوصول إلى النقاط المطلوبة جميعها. ويوجد عدة مكنزمات وتركيبات آلية تؤمن هذه الحركة، من أبسط أنواع التركيبات التي تؤمن ثلاث درجات حرية هي تركيبة المنزلقات الخطية المتعامدة لتؤمن الحركات على المحاور  $x$  و  $y$  و  $z$  على الترتيب بحركة مستقلة. أحياناً ولتأمين الجساءة في الحركة قد نستخدم محورين متوازيين بالاتجاه  $z$ ، وذلك لتخفيض الاهتزازات ويكون كلا المحورين متزامناً مع الآخر بشكل كامل.

- يوضح الشكل الآتي طبيعة هذه التركيبة:



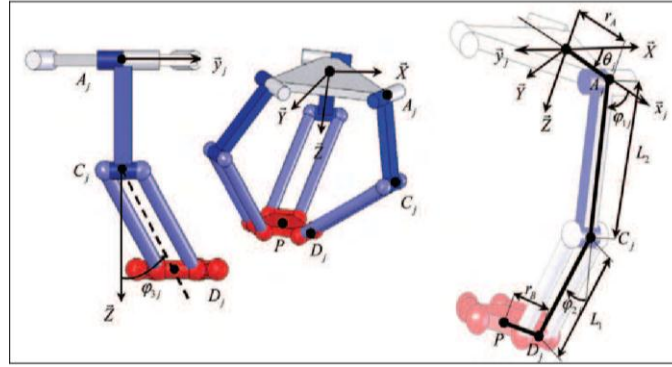
الشكل (1.4) تركيبة المنزلقات الخطية المتعامدة

- يوجد تركيبات أخرى تستخدم لتأمين الوظيفة نفسها مثل: تركيبة المنزلقات المثلية ديلتا، ولكن نسبة النقل تبقى أكبر بكثير ، أي إن الدقة أقل إلا من خلال إضافة عناصر تخفيض السرعة على مخرج المحركات.



الشكل (2.4) تركيبة المنزلقات الخطية المتعامدة وتركيبه دلتا

ولكن أيضاً تتصف التركيبات ديلتا بقلّة الجساءة، وبزيادة معدل الاهتزازات والأخطاء ونتيجة مرونة الوصلات ولذلك وقع الاختيار على تركيبة المنزلقات الخطية المتعامدة، كونها أكثر جساءة ، وأبسط من الناحية العملية.



الشكل (3.4) تركيبة دلتا.

\* تتألف الآلة من أجزاء عدّة:

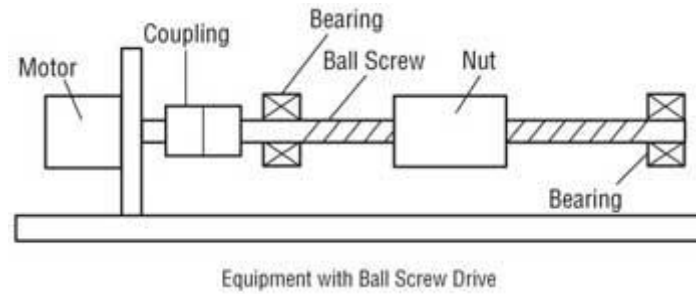
- إجراء القيادة الإلكترونية.
- الهيكل والتركيبات الآلية.
- المحركات الخطوية.
- مجموعة المنزلقات الخطية والقارئات المرنة.
- أجهزة التغذية بسلك البوليمير وأجهزة التسخين والتلدين ورأس البثق الحراري.
- جهاز تسخين النموذج.

كل هذه الأجزاء مبروطة إلى أجهزة القيادة الإلكترونية التي تقوم بتنفيذ التعليمات G-Code في الذاكرة ، وترسل الإشارات إلى عناصر القيادة Drivers والتي تقوم بدورها بقيادة المحركات

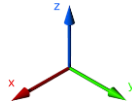
الخطوية Stepper بشكل متزامن لتأمين الحركة الضرورية Motors وترسيب الطبقات البلاستيكية طبقة تلو الأخرى للوصول للنموذج النهائي.

#### 2.4. الهيكل والتركيبات الآلية:

-تم تأمين مجموعة جاهزة من المنزلقات من نوع Panowin تعتمد هذه المنزلقات على الحلزونات ذات الكريات لتأمين الحركة, وتم اختيار هذا النوع بالذات لأنه يؤمن أعلى درجات الدقة ونسبة نقل منخفضة للغاية. حيث نسبة النقل تساوي خطوة الحلزون  $P$  مقسومة على عدد الأبواب  $N$ . نسبة النقل هي  $14\text{mm/Rev}$ .



الشكل (4.4) هيكل الآلة



الشكل (5.4) الحلزون ذو الكريات.

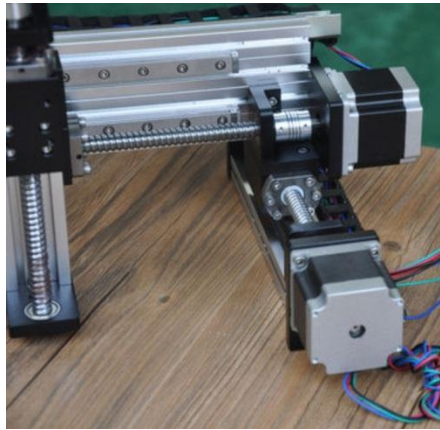
طول الشوط  $130\text{mm}$  بالاتجاه  $y$  و  $x$  و  $z$ , إن أبعاد التشكيل هي:  $130 \times 130 \times 130$ , وهو جسم أكبر مجسم يمكن طباعته.

-تحتوي الآلة أيضاً على منزلقات خطية Sliders لتأمين الجساءة.

تتألف من رولمان خطي انسحابي ودليل أو سكة Rail أو Guide .



الشكل (6.4) المحامل الخطية الانسحابية.



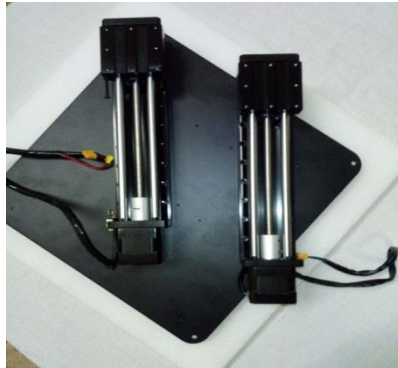
الشكل (7.4) عملية الحمل الانزلاقي.

-تم شراء مجموعة كاملة تحتوي على المحرك والقارئة والحلزون والمنزلاقات الخطية حيث تطلبت الآلة أربع مجموعات.مجموعة للمحور  $x$  ، ومجموعة للمحور  $y$  ، ومجموعتين للمحور  $z$  .  
وذلك بسبب الحمولة العالية الناشئة عن وزن الوصلات ووزن رأس البثق الحراري.

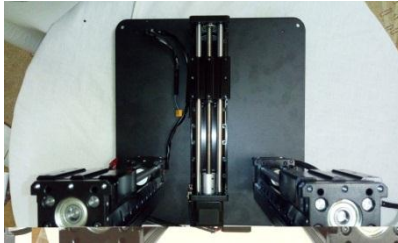


الشكل (8.4)مجموعة الحركة الخطية.

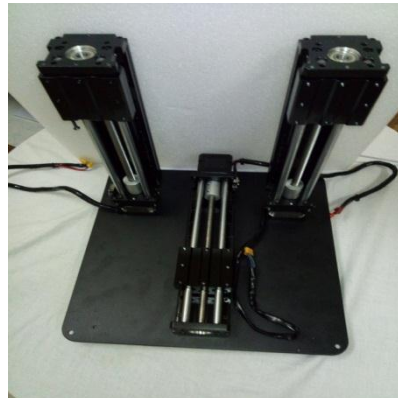
تم تجميع المحاور الأربعة باستخدام لواب M6 وبشكل متعامد للحصول على الهيكل المبني بالشكل :



الشكل (9.4) تركيب الهيكل.



الشكل (10.4) تجميع الهيكل.



الشكل (11.4) الهيكل النهائي.

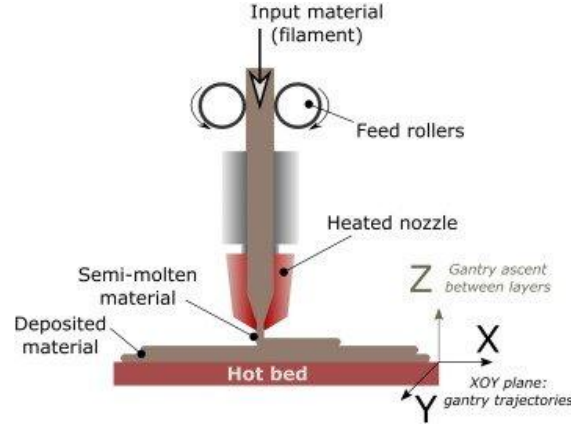
### 3.4. رأس البثق الحراري :

يتكون رأس البثق الحراري من جزئين أساسيين:

- المغذي Fcder : والمسخن Heater :

## - رأس البثق : Nozzle

-يقوم المغذي بسحب السلك البلاستيكي من البكرة , ويدفعه باتجاه المسخن Heater الذي يقوم برفع درجة حرارة البوليمر إلى درجة تفوق درجة حرارة الخول الزجاجي حيث يصبح البوليمر (لدناً) بشكل كبير , وقابلاً للالتصاق أيضاً.



الشكل (12.4) رأس البثق الحراري.

-يحتوي جهاز التسخين أيضاً على مبادل حراري في جزئه العلوي ومروحة تبريد عند مكان دخول السلك البوليميري من المغذي , وذلك لضمان استمرار عملية التغذية بالشكل السليم واستمرار قوى الضغط العلوية من دون تشوّه السلك عند فتحة الدخول. في الجزء السفلي من المسخن تتم عملية التسخين ودفع المصهور إلى رأس البثق ليتعرض لعملية تشكيل وخفض في القطر إلى القطر المطلوب.



الشكل (13.4) رؤوس البثق الحرارية.

\*في الواقع يوجد نوعان رئيسيان لرؤوس البثق الحرارية: Heating Nozzle Head

أنواع رأس البثق الحراري:

- النوع الأول متصل , يتحرك فيه جهاز التغذية مع الجرد والمسخن والرأس كمجسم واحد ، ومن عيوبه زيادة العطالة, وبالتالي تخفيض سرعة البثق.
- النوع الثاني مستقل , ويكون المغذي ثابتاً بعيداً عن الحركة للرأس ، من ميزات هذا النوع هو تخفيض العطالة, ولكن هنالك زيادة في الأعطال نتيجة زيادة طول السلك والحركة المستمرة.



الشكل (14.4) المبرّد.

#### 4.4. الأجهزة الإلكترونية المستخدمة :

-تم استخدام المتحكم نوع Rumba يدعم 6 محاور مستقلة للحركة بالإضافة إلى حساسات نهاية الشوط, ومنفذ للتحكم بدرجة حرارة سرير التسخين عن طريق إشارة PWM والتحكم بحرارة رأس البثق الحراري , اعتماداً على قيمة حساسات الحرارة Thermistor المتواجدة في الرأس الحراري وكذلك في سرير التسخين.

-يحتوي المتحكم Ruwra أيضا على منفذ يدعم شاشة إظهار LCD وعلى منفذ آخر يدعم SDCard ، أي يحتوي على تعليمات G-Code الخاصة.



وبما أن الهدف هو الحصول على الدقة المطلوبة وبسرعات مقبولة، فإن استخدام المحركات الخطوية يعد الحل الأمثل ، وبسبب انخفاض الأحمال والتي تنحصر بقوى العطالة، فإن المحرك الخطوي يمكن أن يستخدم من دون تغذية راجعة، وذلك لتبسيط الآلة وتخفيض التكلفة.

بالطبع فإن هذا الاختيار متعلق بالتطبيق الذي نقوم بدراسته.

ينتشر بشكل تجاري نوعان من أجهزة القيادة للمحركات الخطوية التي تتوافق مع المتحكم Rumba MCU .

- الأول DRV8825

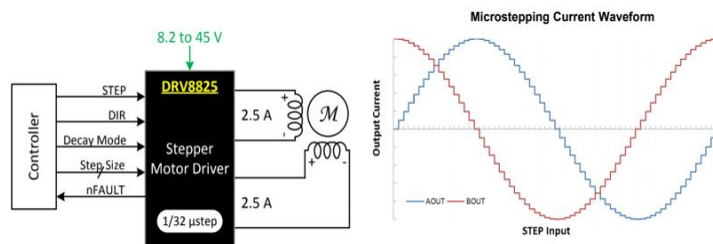
- الثاني A4998

### DRV8825 Stepper Motor Driver

وهو متحكم من إنتاج شركة "Texas Instruments" ، يدعم هذا المتحكم القيادة بطريقة Micro Stepping بدقة تصل إلى 1/32 من خطوة المحرك الأساسية. وتيار لحد 2.5 A . المواصفات الفنية الأخرى للمتحكم موجودة في الملحق.

يدعم هذا المتحكم المحركات الخطوية ثنائية الوشيعة ثنائية القطبية ذو المغناطيس الدائم.

### Permanet magnet Pipolar Steppe Motor



الشكل (17.4) مخطط جهاز القيادة.

## A4988:

وهو متحكم من إنتاج شركة "Anegro" ، وهذا المتحكم بدوره يدعم Micro Stepping أو الخطوات المايكروية.

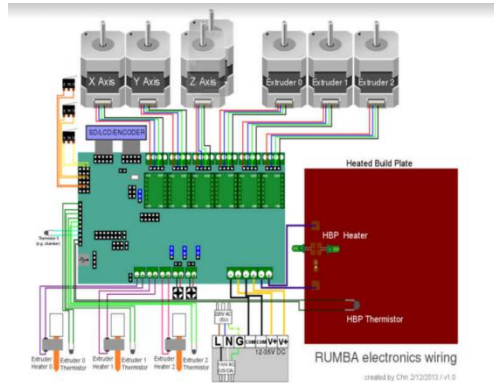
حيث يقسم الخطوة الكاملة للمحرك إلى خطوات صغيرة.

مثلاً محرك دقته  $1.8^\circ$  Full Step عند قيادته Micro Stepping نسبة 1/16 نصل إلى دقة  $1.8^\circ/16$

بالتأكيد فإن هنالك عيوباً لنظام Micro Stepping حيث بزيادة تقسيم الخطوة تزداد نسبة عدم الدقة أو الانزياح عند وجود أحمال ، وبالتالي تتخفض الوثوقية.

نظام FullStep يعطي الجرّ دقة عند موضع معين.

يدعم المتحكم A4988 محرك Bipolar-2Phases-Stepper Motor



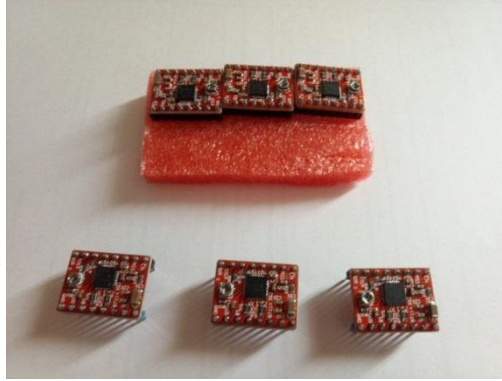
الشكل (18.4) مخطط توصيل المتحكم مع المحركات.

يعمل المتحكم على جهد 35Volt عند تيار أعظمي 2A وهو مناسب للتطبيق.



الشكل (19.4) متحكمات A4988.

بالمقارنة بين المتحكمين تم اختيار المتحكم DRV8825 وذلك لإمكانية زيادة الدقة إلى 1/32 لأغراض تجريبية ولتوافقها مع المتحكم Rumba .



الشكل (20.4) متحكمات DRV8825.

#### 5.4. الرؤوس الحرارية: NOZZR

\*تعمل هذه الرؤوس على تخفيض قطر البوليمر إلى القطر المطلوب.

\*يتوفر تجارياً عدة أقطار للخروج Dout : (0.2-0.4-0.6-0.8-1.00) على الترتيب.

\*إنّ القطر الفعلي للبوليمر المنبثق قد لا يتوافق مع قطر رأس البثق, بل يتعلق ببارامترات من نوع البوليمر ومعدل البثق ودرجة الحرارة وبعد رأس البثق عن الطبقة السابقة.



الشكل (21.4) صور رؤوس البثق.

\*كما تمت الإشارة له سابقاً فإن رأس البثق الحراري وجزء التغذية والتبريد جميعهم تم تحصيلهم في جهاز

واحد The head



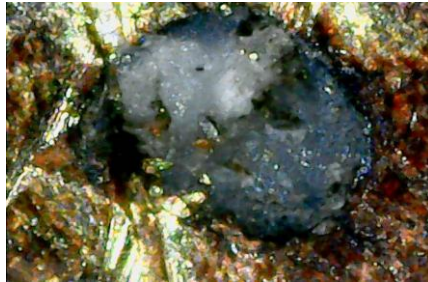
الشكل (22.4) صورة لرأس البثق كاملاً.

\*يتم رفع الحرارة إلى معدل 190-260°C وذلك لتأمين الحرارة المناسبة حسب المادة المستخدمة.

\*يتم صنع رأس البثق من النحاس أو الحديد الكرومي ، ولكن الأكثر انتشاراً هو النحاس بسبب سهولة تشغيله وانخفاض التكلفة.

\*من المشاكل الأساسية التي واجهتنا هي الانسداد المتكرر لرأس البثق، وبرز مسببات الانسداد:

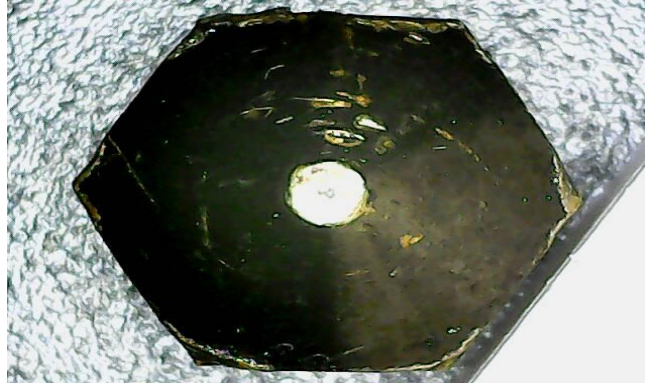
- 1- وجود عدم تجانس في المواد الأولية، ووجود عناصر شائبة.
- 2- تراكم الأوساخ عند رأس التغذية حيث يحصل الانسداد تدريجياً.
- 3- انخفاض المسافة GOP بين رأس البثق والطبقة السابقة ، مما يؤدي إلى منع الخروج وزيادة الضغط وحدوث تصلب جزئي.
- 4- ارتطام رأس البثق عند المعايير بسرير التسخين وحصول تشوه ، وبالتالي انخفاض القطر وحصول الانسداد.
- 5- انخفاض درجة الحرارة يؤدي إلى وصول أجزاء غير متلدنة.
- 6- أيضاً عدم تجانس البوليمر يؤدي إلى تغير درجة الحرارة المطلوبة للصهر أو التلدين وبالتالي تكون الحرارة 220 °C مثلاً ومطلوب 240 °C مما يؤدي إلى زيادة الضغط وحدوث انسداد.



الشكل (23.4) صورة الانسداد.



الشكل (24.4) مجموعة العناصر الإلكترونية.



الشكل (25.4) NOZZLE.

#### 6.4. المحركات المستخدمة:

في الواقع تم استخدام المحركات الخطوية لأسباب عدة:

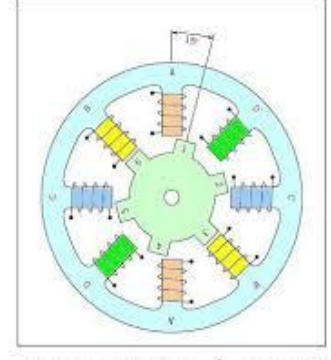
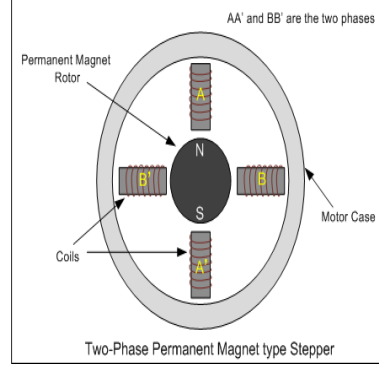
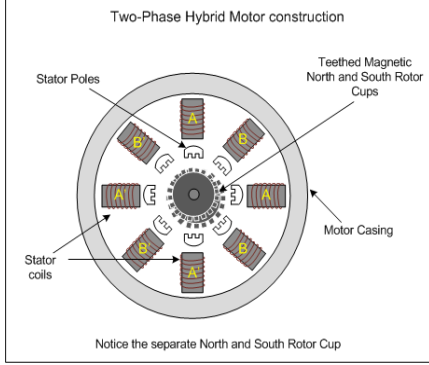
- 1- انتشارها بشكل واسع.
- 2- انخفاض الأحمال للتطبيق المذكور.
- 3- بساطة التحكم. تعتمد المحركات الخطوية على نظام قيادة مفتوح Loop Operation. يوجد أنواع عدة من المحركات الخطوية:

1- الممانعة المتغيرة (نواة فيرومغناطيسية) Variable Reluctance

2- المحرك ذو المغناطيس الدائم Permanent Magnet

### 3- المحرك الهجين Hybrid .

#### –Normal Full Step–Half Step–Micro Stepping



المحركات H

المحركات PM

المحركات VR

الشكل (26.4) المحركات الخطوية.

#### 7.4. النتائج والمناقشة:

تم استخدام ثلاث مواد مختلفة لتصنيع العينات :

- PETG بولي إيثيلين.
- PLA بولي لاسستيك أسيد.
- ABS الأكريلونيتريل - بوتادين - ستيرين.

تمت زيادة درجة الحرارة بالتدريج من  $190^{\circ}\text{C}$  إلى  $250^{\circ}\text{C}$  وللأسف لم نتمكن من دراسة تأثير درجة الحرارة بسبب ضيق المجال الحراري الذي يمكن ضمنه إجراء التجارب لمادة معينة , و كانت درجة الحرارة هي:

$$1-T_{\text{ABS}} = 250^{\circ}\text{C}$$

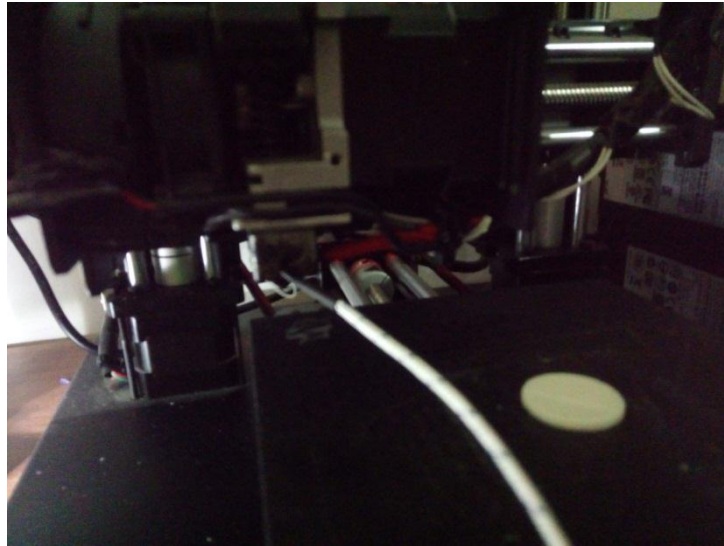
$$2-T_{\text{PETG}} = 220^{\circ}\text{C}$$

$$3-T_{\text{PLA}} = 210^{\circ}\text{C}$$

وتم استخدام المزوجة الحرارية مع شاشة القياس لضبط القيم الفعلية للحرارة عند رأس البثق الحراري.



الشكل (27.4) المزوجة الحرارية.



الشكل (28.4) معايرة الحرارة .



الشكل (29.4) معايرة الحرارة .

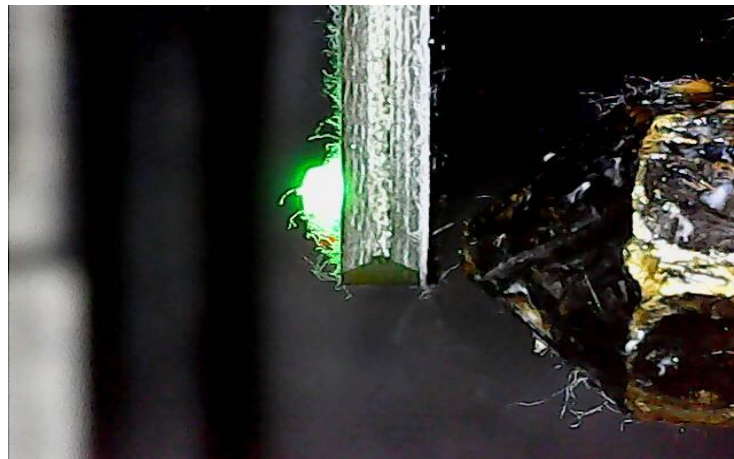
أمّا حرارة BCL السرير يتم ضبطها على درجة حرارة الغرفة. وتمّ اختيار رأس بثق بقطر 0.4mm وكان من الممكن استخدام أقطار أخرى.

بعد معايرة الحرارة باستخدام المزدوجة الخارجية يتم ضبط الحرارة من خلال البرنامج.



الشكل (30.4) معايرة الحرارة برنامج console.

وقبل البدء بالجزء العملي يجب ضبط المسافات الابتدائية بين رأس البثق NOZZLE وسرير التسخين Heating Bed . وذلك لضمان الحصول على سماكة ابتدائية صحيحة.



الشكل (31.4) اصطدام الرأس بسرير التسخين.



الشكل (32.4) رأس البثق الحراري.



الشكل (33.4) سرير التسخين

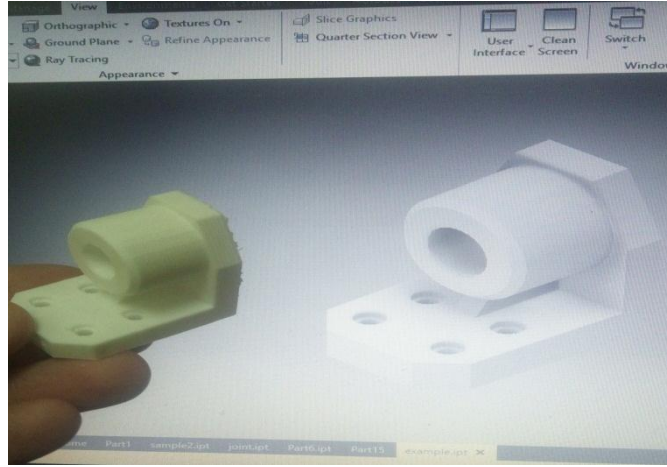
تكون المسافة الابتدائية بين رأس البثق الحراري وسرير التسخين مساوية لسماكة الطباعة  $T=0.85d$  حيث  $d$  قطر فتحة الخروج لرأس البثق الحراري.

وكما ذكرنا يمكن استخدام أنواع عدة من الرؤوس بأقطار مختلفة , وذلك حسب الدقة النهائية المطلوبة.

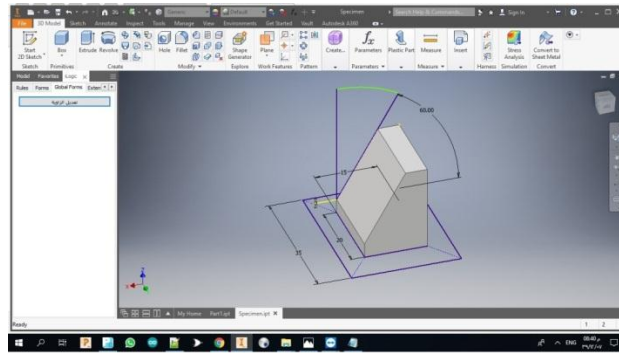


الشكل (34.4) رؤوس البثق المختلفة .

وعند جاهزية آلة الطباعة يجب أن نقوم برسم العينة على برنامج CAD وتحويل الصيغة PART إلى صيغة STL حيث يتم.



الشكل (35.4) رسم العينات.



الشكل (36.4) تصميم النموذج باستخدام Auto cad

وبعد الانتهاء تتم طباعة العينات واحدة تلو الأخرى من الزاوية  $0^\circ$  إلى  $90^\circ$  بفارق عشر درجات على الترتيب حتى الحصول على كامل العينات.



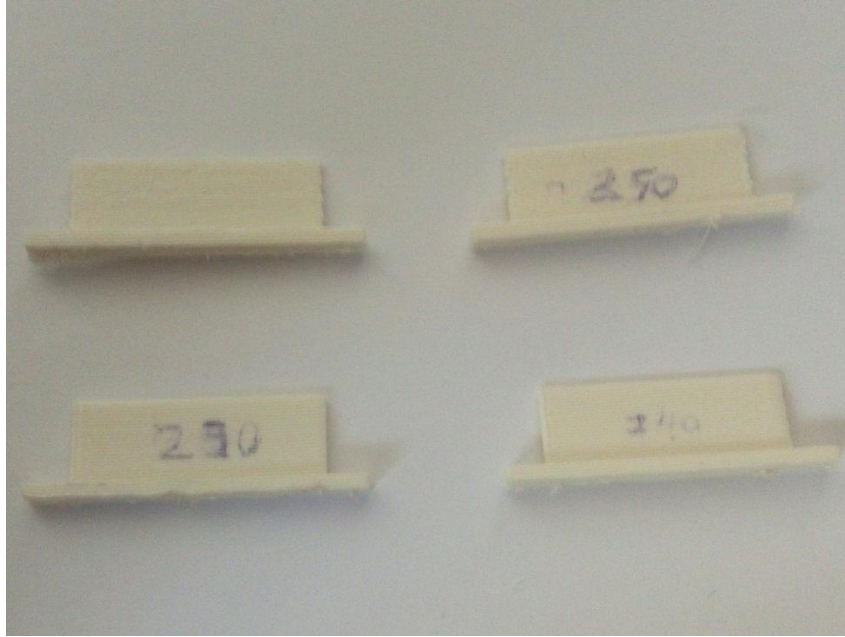
الشكل (37.4) صور كامل العينات.

وبكل مادة تم استخدام عدة سماكات 0.15mm - 0.25mm - 0.45mm على الترتيب.

بالنسبة لمادة PLA كان من غير الممكن طباعة السماكة 0.15mm, بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري, وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً  $210^{\circ}\text{C}$  وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.



الشكل (38.4) عينات اختيار الحرارة PLA220C



الشكل (39.4) عينات اختبار الحرارة  $250^{\circ}\text{C}$  ABS



الشكل (40.4) عينات اختبار الحرارة  $220^{\circ}\text{C}$  PETG

بخصوص مادة PETG حيث الفيديو الذي يوضّح ظهور فقاعات عند رفع درجة الحرارة فوق  $220^{\circ}\text{C}$  وحصول عدم تجانس.

أما خفض الحرارة فأدى إلى عينات مشوهة وحصول انسداد متكرر.

بالنسبة لمادة ABS كانت أفضل جودة عند درجة حرارة  $250^{\circ}\text{C}$ , ولم نتمكن من الطباعة عند  $220^{\circ}\text{C}$  بسبب زيادة القوى المطلوبة بشكل كبير جداً وحصول انسدادات متكررة.

اختيار أبعد ملف STL :

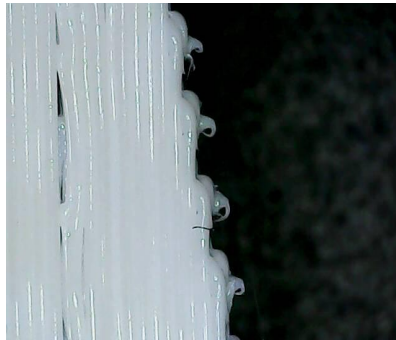
يحوّل ملف STL العنصر إلى إحداثيات نقطية بشكل شبكة سطحية من مثلثات مترابطة يحتوي ملف الـ STL على إحداثيات الرؤوس لكل مثلث على حدة.

وعند زيادة طول ضلع المثلث الفراغي, فإن الشكل الناتج سوف يحتوي على سطوح مستوية واسعة بدل السطوح المنحنية, وبالتالي انخفاض جودة النموذج.

عند بدء العمل لم يتم أخذ هذا العامل في الحسبان , مما أدى إلى ظهور عيوب لا علاقة لها ببارامترات عملية الطباعة, لذلك تم تخفيض طول الضلع إلى  $0.000001\text{mm}$  , وهذا أدى إلى زيادة النقاط وحجم الملف وزمن توليده ولكن أدى إلى نتائج أفضل.



الشكل (41.4) تأثير زيادة طول ضلع الملف STL.



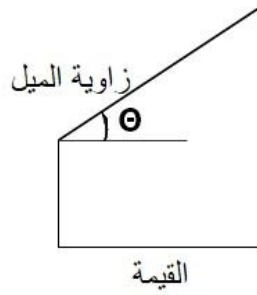
الشكل (42.4) ظهور حواف.

#### 8.4. العلاقة بين الزاوية والخشونة للمواد المختلفة:

- في البداية تم اختبار مادة PTEG عند درجة حرارة  $220^{\circ}\text{C}$  عند ثلاث قيم متتالية للسماكة

0.45-0.25-0.15mm على الترتيب. بزاوية من  $0^{\circ}$  وحتى  $90^{\circ}$

حيث تمثل الزاوية  $0^{\circ}$  الوضع الأفقي ، أما الزاوية  $90^{\circ}$  تمثل الوضع الشاقولي.



الشكل (43.4) زاوية الميل والقيمة.

بعد الأبحاث الأخرى تعين من  $0^{\circ}$  وحتى  $180^{\circ}$  ، ولكن الزوايا من  $90^{\circ}$  وحتى  $180^{\circ}$  تمثل تكراراً للسطح من  $0^{\circ}$  إلى  $90^{\circ}$  ولكن باتجاه آخر ، لذلك تم الاكتفاء من  $0^{\circ} - 90^{\circ}$  .

تم قياس الخشونة عن طريق جهاز برأس هرمي يقيس Ra الخشونة المتوسطة.

حيث يأخذ 9 قراءات متتالية لعمق الأوعية بالتتالي، وبحسب المتوسط الحسابي للقراءات التسع،

ويعطي الواحدة ب  $\mu\text{m}$ .



الشكل (44.4) جهاز الخشونة .

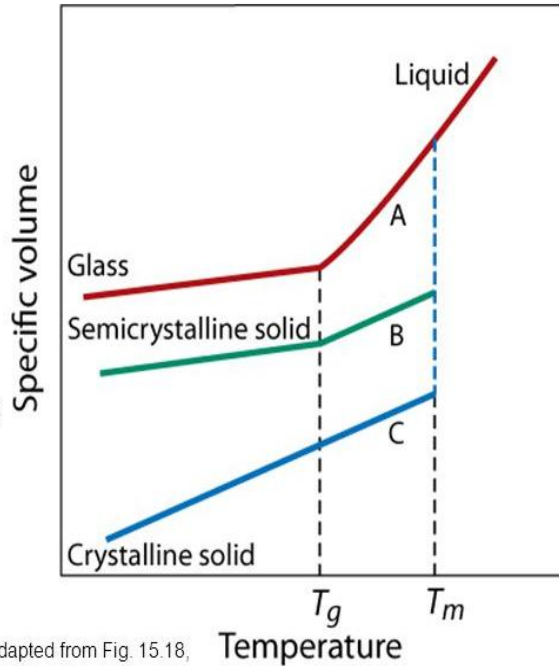
بعد قياس الخشونة تمّ قياس الأبعاد الأساسية للنموذج بمعرفة العلاقة بين الأبعاد الأسمية والأبعاد المخبرية للعينات وارتباطها بسماكة الطباعة تم أخذ كل بعد اسمي من ثلاث مناطق مختلفة, بسبب ملاحظة حدوث تفاوت في الأبعاد من مكان لآخر.

ويعزى هذا التغيير إلى حدوث انفعالات حرارية وتشوهات عند بثق البوليمر ، والذي يتأثر بدوره بحرارة السرير وحرارة رأس البثق وسرعة الطباعة.

" ملاحظة: تعمل حرارة السرير على تسهيل التصاق طبقات البوليمر بعضها ببعض فضلاً عن تخفيض التشوهات قدر الإمكان بسبب فرض عملية تبريد متجانس لكامل القطعة المراد طباعتها, ولكن الهدف الأساسي هو رفع الحرارة إلى ما فوق حرارة الخول الزجاجي.

### What factors affect $T_m$ and $T_g$ ?

- Both  $T_m$  and  $T_g$  increase with increasing chain stiffness
- Chain stiffness increased by
  1. Bulky sidegroups
  2. Polar groups or sidegroups
  3. Double bonds or aromatic chain groups
- Regularity (tacticity) – affects  $T_m$  only



الشكل (45.4) مخطط الخول الزجاجي ، وتأثير البنية في الحجم النوعي.



الشكل (46.4) صورة العينة PLA60



الشكل (47.4) عملية قياس الخشونة.



الشكل (48.4) البنية السطحية للكرة سماكة 0.25

اما لقياس الأبعاد يتم استخدام مقياس فرينيه :



الشكل (49.4) قياس أبعاد العينة.



0 Degree



10Degree

الشكل (50.4) زاوية الميل.

#### 9.4 معايرة الآلة:

قبل البدء في أي اختبارات يجب معايرة الآلة , والتأكد من بارامتراتنا , ودقة الحساسات الموجودة ضمنها باستخدام أجهزة قياس عيارية :

##### 1- معايرة دقة الميكانزم:

من المفترض التأكد من الدقة على الخرج مباشرة عند دراسة الطباعة من خلال إعطاء الأمر بالحركة والتأكد من دقة النتائج, ومن الغير المحبذ في استخدام Dialogue في هذه الحالة لأنه لا يمكن تحديد موضعه وبدقة , ويتم الاستعانة ب Digitizer خاص للقيام بهذه التجربة

##### 2- معايرة درجة الحرارة:

تتم معايرة درجة الحرارة باستخدام جهاز خاص قياسي يحتوي على مزدوجة حرارية الشكل (27.2) المزدوجة الحرارية وقارئ تتم مقارنة قراءات حساسات الآلة مع القيم الفعلية وإجراء تعديلات استناداً إلى العلاقة بينهما.

##### 3- معايرة أقطار أسلاك البوليمير والتركيب الكيميائي:

يحتوي البوليمير على مركبات إضافية كالملدنات والتي يجب أن تؤخذ في الحسبان في أثناء الدراسة,

حيث لدينا ثلاث مواد :

1-ABS

2- PET

3- PLA

وسيتّم إرسال عينات إلى مخبر متخصص لتحليلها وتزويدنا بالنتائج. بالنسبة للأقطار فهي متغيرة العينة الاسمية القياسية هي 1,75 , وسيتّم تسجيل القيم الفعلية مع كل عملية اختبار.

##### 4- معايرة قطر البثق dp وشكله:

تتمّ معايرة القطر باستخدام مجهر ضوئي, لأن شكل فتحة النموذج , والقطر الاسمي وأي انحرافات ستؤدي دوراً مهماً في الدقة النهائية. ولكن بنية الميكانيزم تؤدي إلى انخفاض الدقة النهائية.

جدول مقاومة الدقة بين الآلات المختلفة في النهاية تم الاستعانة بآلة من نوع ((Trimus)) وتم استيرادها.

#### 10.4. تحضير العينات

نظراً لعدد البارامترات الكبير المؤثر في دقة النموذج كان لابد من الاستعانة بعدد هائل من العينات لكن هناك بعض البارامترات على سبيل المثال زاوية الترسيب يمكن أن يتم إنشاء نموذج واحد على عدة زوايا لتخفيض الزمن وعدد العينات المطلوب من المشاكل هي عدم وجود عينات عيارية تستخدم في البحث .

#### 11.4. الأجهزة المستخدمة في عملية القياس

- نوع Micrometer Tolesn بدقة  $\pm 0,05 \text{ mm}$  دقة 10mm

جهاز قياس الخشونة السطحية surface profile GMNGE لقياس  $R_z$

جهاز قياس الحرارة بالأشعة تحت الحمراء: نوع

مزدوجة حرارية مع شاشة إظهار المعايرة نوع TM 902 C

مجال الزوايا من 0-90 بخطوة 10 درجات "10"

مجال الحرارة من 190-250 بمجال خطوة 10 درجة

السماكة من 0 و 35 مجال خطوة 0.05

أي 8 درجات مختلفة. وذلك 3 مواد مختلفة.

عدد العينات  $= 10 \times 7 \times 8 \times 3 = 1680$  نتيجة

وهذا يستغرق وقتاً طويلاً للغاية SPECTMENT

وهناك تغيير القطر لرأس البثق DP :

0,4

0,6

0,8

عدد العينات الكلي  $6720 = 4 \times 3 \times 8 \times 7 \times 10$  نتيجة

متوسط زمن العينة هو 10 دقائق, أي أننا نحتاج إلى 3 أشهر عمل متواصل 39 يوماً. لفة الطابعة SORM وهي الأفضل دقة للمعيار طبعاً

النموذج الرياضي لتحديد بنية القطعة نظرياً.

$$\cos \alpha = \frac{\Delta h}{t}$$

$$\alpha = 0$$

$$\alpha = 45$$

$$\alpha = 90$$

$$\Delta h = t \times \cos \alpha$$

المعادلة غير مستمرة

من العوامل الأخرى التي تؤثر في الدقة موضوع مسار رأس البثق الحراري Nozzle trajectory

وقد حملت معظم الدراسات هذا المعيار, فمسار رأس البثق ليس بالضرورة أن يكون مطابقاً لحدود النموذج

كما أن شكل رأس البثق له تأثير مهم بمنطقة الدراسات عملت على تغيير شكل رأس البثق من الشكل

الدائري المعتاد لمقاطع أخرى للحصول على مقاطع مربعة الشكل آخذين بعين الاعتبار تغيير شكل

المقطع المصهور فإن خروجه عن رأس البثق الحراري بسبب بيولوجيا المادة البوليميرية[5]

وانتقلت معظم المراجع موضوع سرعة التبريد.

تشير بعض المراجع إلى أن البوليمير في الحالة الصلبة يمكن أن يكون على إحدى بنيتين:

1- بنية كريستالية Crystalline structure عند التبريد البطيء.

## 2- بنية المورفية الزجاجية Amorphic structure.

حيث تمتاز النسبة المورفية الزجاجية بحجم نوعي عالٍ مقارنة بالبنية الكريستالية مما يخفض نظرياً من التشوه الحراري بسبب اقتراب الحجم النوعي من الحجم النوعي لدرجة الانصهار  $T_m$ . لوحظ في معظم آلات الطباعة وجود مبرّد إضافي للبوليمير المصهور لحظة خروجه والتصاقه بالنموذج من دون إعطاء دليل علمي كافٍ عن الحاجة لهذا التبريد.

يسوّغ بعض المنتجين للآلات سبب التبريد بأنه لتخفيض التشوّه الحراري، ولزيادة التصاق المصهور بالنموذج [ 4 ].

ولكن تصوري أن هذا التبريد قد يؤدي إلى الحصول على بنية الورقية كما ذكرنا سابقاً.

### 12.4. الآلة المستخدمة:

يوجد في السوق عدد كبير ومتنوع من الآلات مختلفة الأبعاد، وبعد بحث مطول كان لابد من الحصول على الآلة التي تعطي الدقة الأكبر للمسار، لإلغاء احتمال تأثير انخفاض الدقة الميكانيكية على الدراسة. حيث تعتمد معظم الآلات FDM على تركيبات مكونة من بكرات Pnhg وسبورسنة Timigbelt or Temedbelt . تتخفف الدقة في مثل هذه التركيبات إلى [0.00] mm ولسبب واضح وهو دخول معامل مرونة السير في النتائج وخصوصاً بسبب وجود قوة عطالية هائلة تؤدي إلى اهتزازات بحالات كبيرة نوعاً ما.

لذلك نفضل استخدام آلة تعمل على ballscrew حيث يستخدم تأثير المرونة ، ويبقى كامل الخلوصات موجودة backlash ولكن الدقة الإجمالية للميكانزم تصل لحوالي 0.001 mm وحيث إن قيمة الخشونة المتوقعة من مرتبة 70Mm 0.070 mm فإن نسبة الخطأ تعتبر هندسياً مقبولة وذات تأثير طفيف على دقة النتائج.

لم يتم دراسة الآلات التي تعتمد على التركيبية  $\Delta$  بشكل واقعي، لكن المعتقد أن الدقة منخفضة للغاية، فهي من الناحية التجريبية بسبب السرعة العالية. من المهم عند إنشاء العينات عدم إغفال تأثير تعديل تموضع راسي البثق Nozzle Trajectory لذلك كان من الأفضل التركيز على العينات مربعة القطعفي القاطعة المربعة يكون مسار الجداء الخارجي على شكل خطوط مستقيمة ينطبق فيها مسار رأس البثق مع الجداء

تماماً على عكس القطع الأخير , حيث يحصل انحراف يتصور بمعادلات تدخل ضمن برنامج التقطيع Slicer ولا يمكن التحكم بدقة بها بمعرفة سبب عدم القدرة على الدخول لنظام التقطيع المغلق , ولا يمكن الاصطلاح على المعادلات المستخدمة . بشكل عام يتم حساب المسافة  $\Delta p$  اعتماداً على سماكة الترسيب  $t$  وعوامل أخرى كالحرارة وسرعة الطباعة سيتم توليد عينات بسماكات مختلفة حسب الجدول عند كل رأس بثق يوجد مجال محدد للسماكة

$$T_{max} \approx 0.55 dp$$

من أجل قطر

$$T_{max} = 0.48dp = 0.4 \text{ زاوية الترسيب } \alpha = 0 \sim 90^\circ$$

$$T_{max} = dp = 0.2$$

$$T_{max} = dp = 0.6$$

$$T_{max} = dp = 0.8$$

من خلال الدراسات السابقة يتبين أن العوامل الأساسية هي

- سماكة الطباعة  $T$  devotion thin
- زاوية الترسيب  $\alpha$  devotion angle
- نسبة السء Firm range
- نسبة التدفق  $Q [\frac{m^3}{s}]$  إلى نسبة التغذية Fims
- قطر رأس البثق  $dp$
- درجة حرارة خروج البوليمير من رأس البثق  $T_N$  ودرجة حرارة المجسم  $T_d$
- نوع البوليمير المستخدم حيث لدينا حالياً ثلاثة أنواع رئيسية:  
ABS –PET–PLA

تعدّ الأكثر استخداماً على الصعيد التجاري.

## الفصل الخامس

### قياس الخشونة من خلال تحليل الصور

#### Measure surface roughness throw image processing

تم التقاط صور مجهرية بمقياس مختار لكل عينة لقيم خشونة للسطح حيث تم استخدام مايكروسكوب. للقيام بهذه العملية تم ترتيب العينات حسب المادة والسماكة والزاوية، تم التقاط الصور لها من الجانب لإبراز السطح المعبر عن الخشونة. واجهتنا الكثير من الصعوبات في أثناء القيام بهذه المهمة حيث تحتوي بعض العينات على سطح جانبي مشوّه أو مختلف عن قيمة السطح . في المنتصف وأحياناً كانت قيم الخشونة قليلة جداً ومتداخلة بحيث إنها لم تظهر بالشكل الواضح على الشاشة. وبعد النقاط جميع الصور تم تجميعها وترتيبها من أجل معالجتها وحساب كل من قيمة الخشونة على الترتيب Ra و R2

$$R_2 = \frac{[(R_1 + R_2 + \dots . R_5) - (R_6 + R_7 + \dots . R_{10})]}{5} \quad (1 - 5)$$

حيث إن R2 حتى R1 أعلى خمسة حجوم

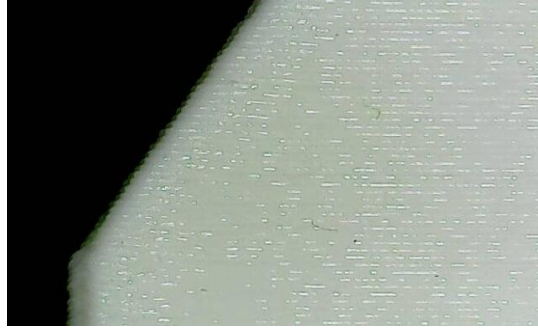
حيث إن R10 حتى R6 أدنى خمسة أعماق

وأيضا القيمة المتوسطة للخشونة Ra:

$$R_a = 1/L \int_0^l |y - y_{ava}|. dx \quad (2 - 5)$$

حيث

$$y_{ava} = 1/L \int_0^l y. dx \quad (3 - 5)$$



الشكل (1.5) صور بعض العينات.

وهذا البرنامج يحتوي على عدد من المكتبات المعنية بمعالجة MATLAB لمعالجة الصورة تمّ الاعتماد على برنامج الصورة ، ويسهل على الباحث القيام بالحسابات والتحليلات اللازمة بسرعة وسهولة. تم انشاء برنامج بسيط للقيام بهذه المهمة حيث يقرأ الصورة من المجلد الخاص بالعينات ، ويقوم بتحويلها الى مصفوفات ومعالجة ضمن مجلد العينات EXCEL هذه المصفوفة للحصول على المعلومات المطلوبة وتخزين القيم والنتائج ضمن جدول.

وهذه الطريقة سرّعت وسهّلت عملية فحص العينات بشكل شبه أوتوماتيكي.

حيث يمكن الاستفادة من البرنامج هذا في المستقبل للقيام بدراسات وتحليلات في مجالات مختلفة.

طريقة عمل البرنامج ومراحله :

في البداية تتمّ تجميع صور العينات المأخوذة جانبياً في مجلدات وتسميتها حسب قيمة الزاوية.

في المرحلة الثانية تتمّ قراءة صورة العتبة باستخدام التابع imread.

على الترتيب من الزاوية 0 حتى 90 ويتمّ تخزين الصورة ضمن متحولات مصفوفاتية.

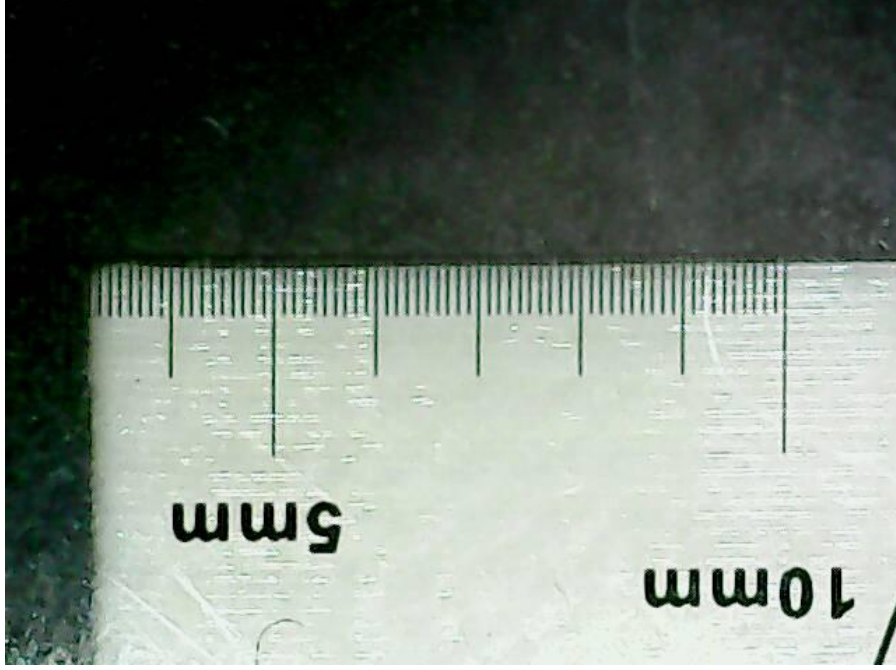
من المعلوم أن كل صورة هي عبارة عن مصفوفة  $3 \times m \times n$

N عدد الأسطر .

M عدد الأعمدة .

ترمز للألوان الثلاثة (أحمر ، أخضر ، أزرق) على الترتيب RGB .

للحصول على نتائج دقيقة في البداية كان لابد من إيجاد مقياس الصورة ( . imageScale ) ولذلك تم التقاط صورة لعينة تحتوي على مقياس مدرج دقيق ومن خلال تحديد العلاقة التي تربط عدد البكسلات التي تعادل 1mm.



الشكل (2.5) يوضح صورة العينة تحتوي على مقياس مدرج .

لتحديد مقياس التصغير الفعلي في الثانية Scale :um/pixel .

يتم ضرب أي قيمة بهذا المعامل للحصول على قيمة الخشونة المطلوبة.

في المرحلة التالية نحلل طول العينات إلى ثلاث طبقات , كما ذكرنا سابقاً أخضر - أحمر - أزرق ثم نقوم بإلغاء طبقة اللون الأخضر والأزرق للحصول في النهاية على الصورة وحيدة اللون, لتسهيل عملية التحليل اللاحقة.

في أي من البكسلات في المرحلة اللاحقة نقوم باستنتاج إحداثيات الحواف, باستخدام التابع Edge

إما البكسلات في المصفوفة البعيدة عن الحواف بالقيمة [1].

للحصول على أقصى فلترة ممكنة F يتم ضبط معامل التصفية إلى إشباع المصفوفة بقيمة غير صحيحة, بسبب زيادة الحساسية  $F >$ , وتم اختيار هذا المعامل بشكل تجريبي حيث أدت القيم المرتفعة 0.15

اما القيم المنخفضة فأدت إلى انخفاض الحساسية وتجاهل الكثير من النقاط المتمركزة عند الحواف.

$$F > 0.12$$

للحواف إلى أشعة المرحلة التالية حيث تحويل المصفوفة الثنائية BW.

تحتوي على إحداثيات النقاط  $y;x$

هي البيكسل  $Y;x$  بالطبع فإن الواحدة لمصفوفة بسيطة.

حيث :

هي رقم السطر والعمود  $V;U$

$n;m$  هي عدد الأسطر والأعمدة الكلي.

$x;y$  هي احداثيي النقطة التي قيمتها 1

هي عدم ترتيب القيم بشكل متسلسل اعتماداً على تزايد القيمة  $X,y$  من المشاكل التي واجهت إصدار الأشعة  $X$ .

لذلك قمنا بإعادة ترتيب الأشعة بالاعتماد على التابع Sort.

في المرحلة التالية كان يجب تدوير الخط المتوسط Mean Line.

بحيث يكون موازياً للمحور  $X$

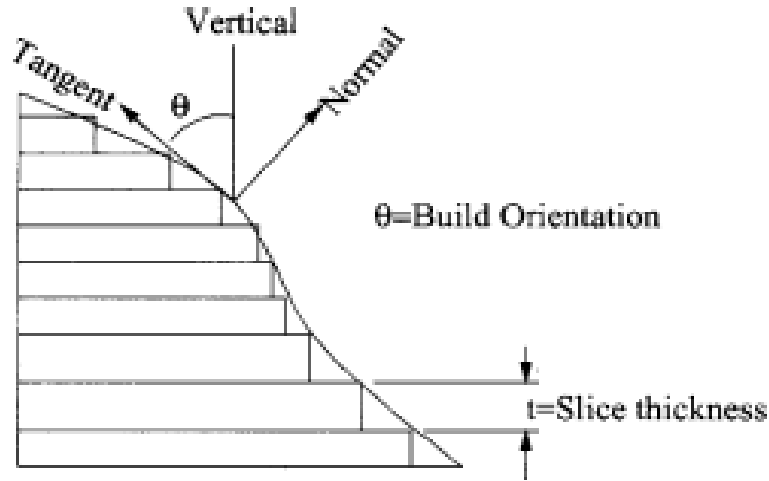


Fig. 1. Staircase effect in RP parts.

الشكل (3.5) الزاوية ثيتا ( $\theta$ ).

يوضح الشكل توضع منحنى الخشونة قبل و التدوير وبعده بزاوية ( $\theta$ )

قمنا بإلباس مجموعة النقط بكثير حدود من الدرجة الأولى عن طريق التابع Line Mean لإيجاد

إحداثيات الخط المتوسط Polyfit

ومن ثم تم الحصول على ثوابت المعادلة الأساسية المحددة بهذا الخط:

$$P = A1X + A0 \quad (4 - 5)$$

$m=A1$  هو ميل المنحني .

$A0$  مقدار الانحراف عن مبدأ الإحداثيات.

نقوم بإيجاد القيمة الفعلية للزاوية من خلال المعادلة:

$$a \tan(A1) = 0 \quad (5 - 5)$$

ولكن قبل التدوير لابد من نقل مركز الصورة إلى مركز الإحداثيات:

Center-of-image ولذلك نوجد المركز باستخدام التابع  $x$  وبعدها نبذل قيم الإشعاع :

$$X = x - xcenter \quad (6 - 5)$$

$$Y = y - ycenter(7 - 5)$$

الخطوة التالية هي التدوير حسب المصفوفة R

$$[x2; y2] = Rx[x1; y1](8 - 5)$$

ثم نقوم بإعادة مركز الثقل إلى مكان الأصلي

$$X = x + xcenter(9 - 5)$$

$$Y = y + ycenter(10 - 5)$$

الخطوة التالية هي حساب قيمة الخشونة المتوسطة Ra

في البداية لتحديد قيمة المحور المتوسط yav , MeanLine

$$Yav.L = A \quad (11 - 5)$$

$$Yav = \frac{1}{L} \times A \quad (12 - 5)$$

$$L = Xmax - Xmin \quad (13 - 5)$$

$$A = \int_{Xmin}^{xmax} f(x).dx = \sum_{xmin}^{xmax} [F(Xm)(Xn - Xn - 1)] \quad (14 - 5)$$

لحساب التكامل أيضاً يمكن استخدام التابع Area

يجب حساب مساحة التسخين على المحور yav أي إن بعد حساب قيمة Yav

$$Ra = \frac{A3}{\Delta X} (15 - 5)$$

فعلينا اختيار أكبر وأقل خمسة أعماق إما لحساب Rz

$$Rz = (\sum_1^5 y_{max} - \sum_1^5 y_{min})/5 \quad (16 - 5)$$

ولكن للأسف هنالك اختلاف بين القيم الناتجة عن تحليل الصور وعن القيم الفعلية الناتجة عن القياس المباشر.

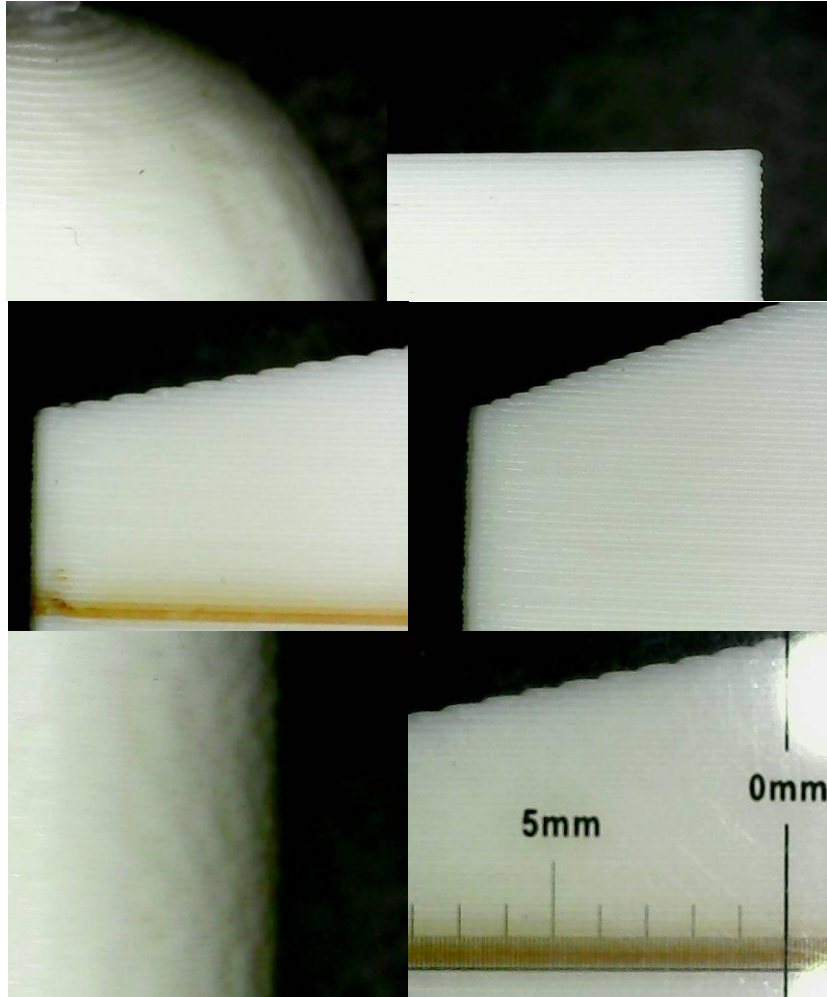
## الفصل السادس

### النتائج

تم في هذا البحث دراسة تأثير درجة الحرارة لمادة ABS الأكريلونيتريل - بوتادين - ستيرين فكانت أفضل جودة عند درجة حرارة  $250^{\circ}\text{C}$  ولم نتمكن من الطباعة عند  $220^{\circ}\text{C}$  بسبب زيادة القوى المطلوبة بشكل كبير جداً وحصول انسدادات متكررة.

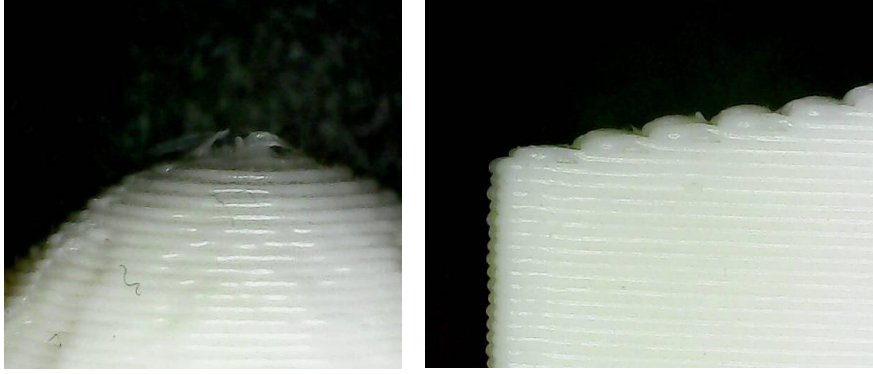
#### 1.6. صور العينات :

ABS 0.15 mm



يبين الشكل (1) صور لعينة ABS عند سماكة 0.15 mm

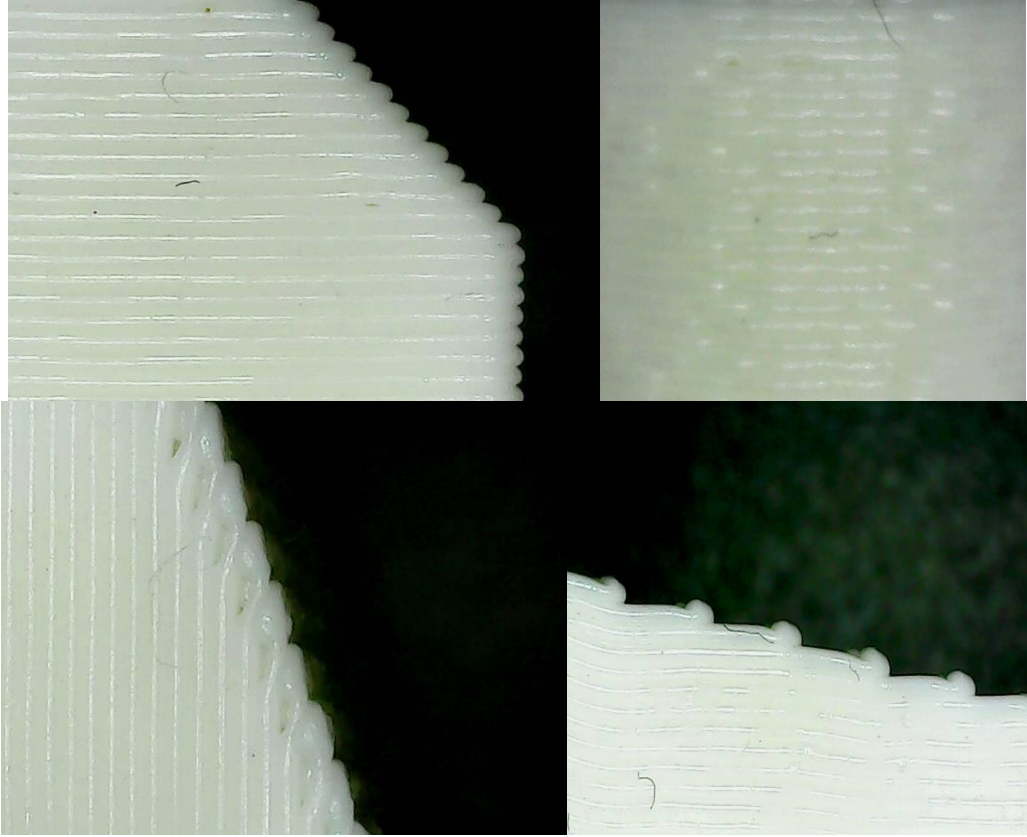
### ABS 0.25 mm



يبين الشكل (2) صور لعينة ABS عند سماكة 0.25 mm

نلاحظ من الشكل كيفية تشكل الحواف عند سماكة 0.25 mm وأن خشونة السطح مناسبة عند درجة حرارة 250 .

### ABS 0.35 mm

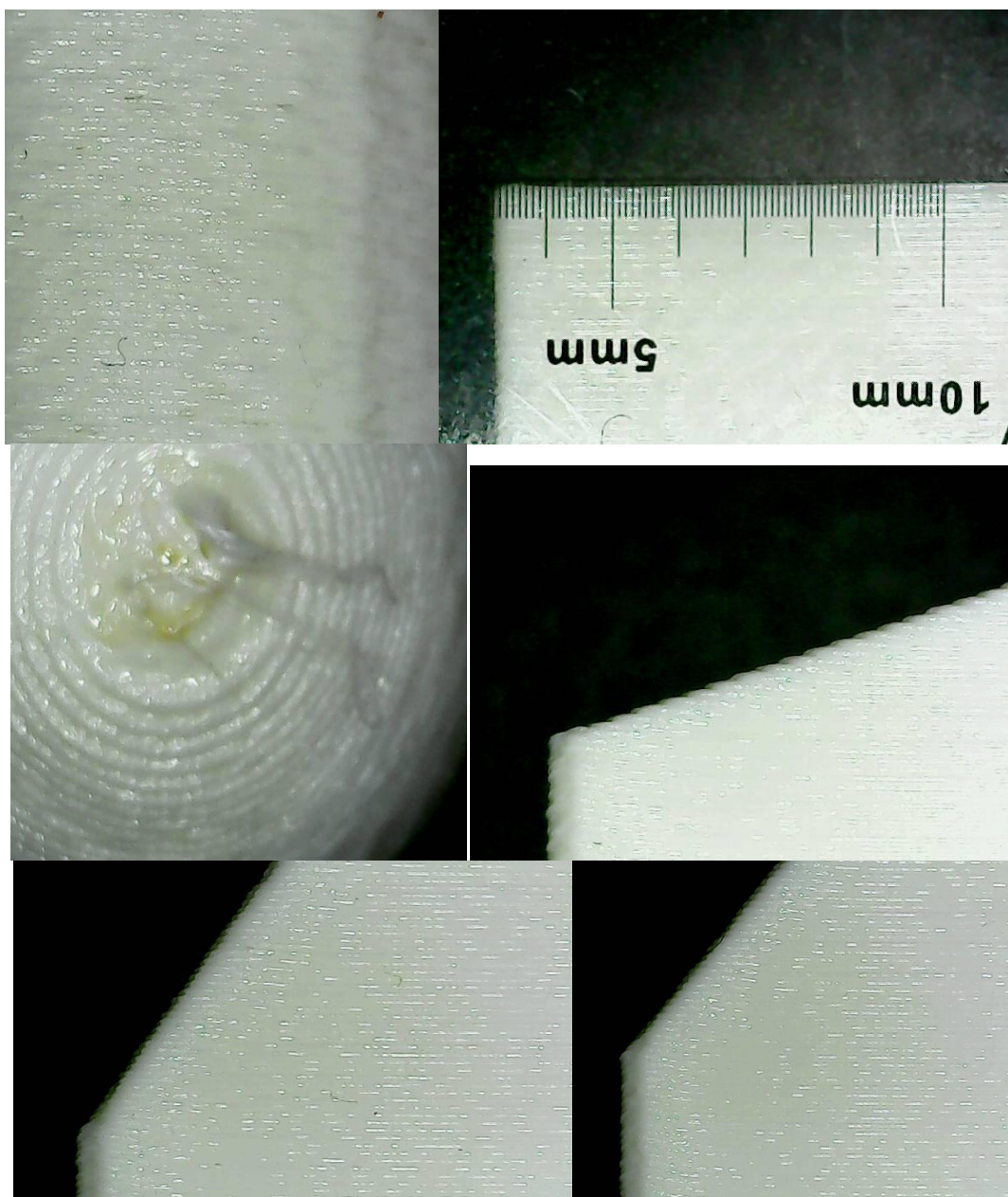


يبين الشكل (3) صور لعينة ABS عند سماكة 0.35 mm

2- بخصوص مادة PETG لوحظ ظهور فقاعات عند رفع درجة الحرارة فوق  $220^{\circ}\text{C}$  وحصول عدم تجانس. أما خفض الحرارة فأدى إلى عينات مشوهة وحصول انسداد متكرر.

كما توضح الصور التالية:

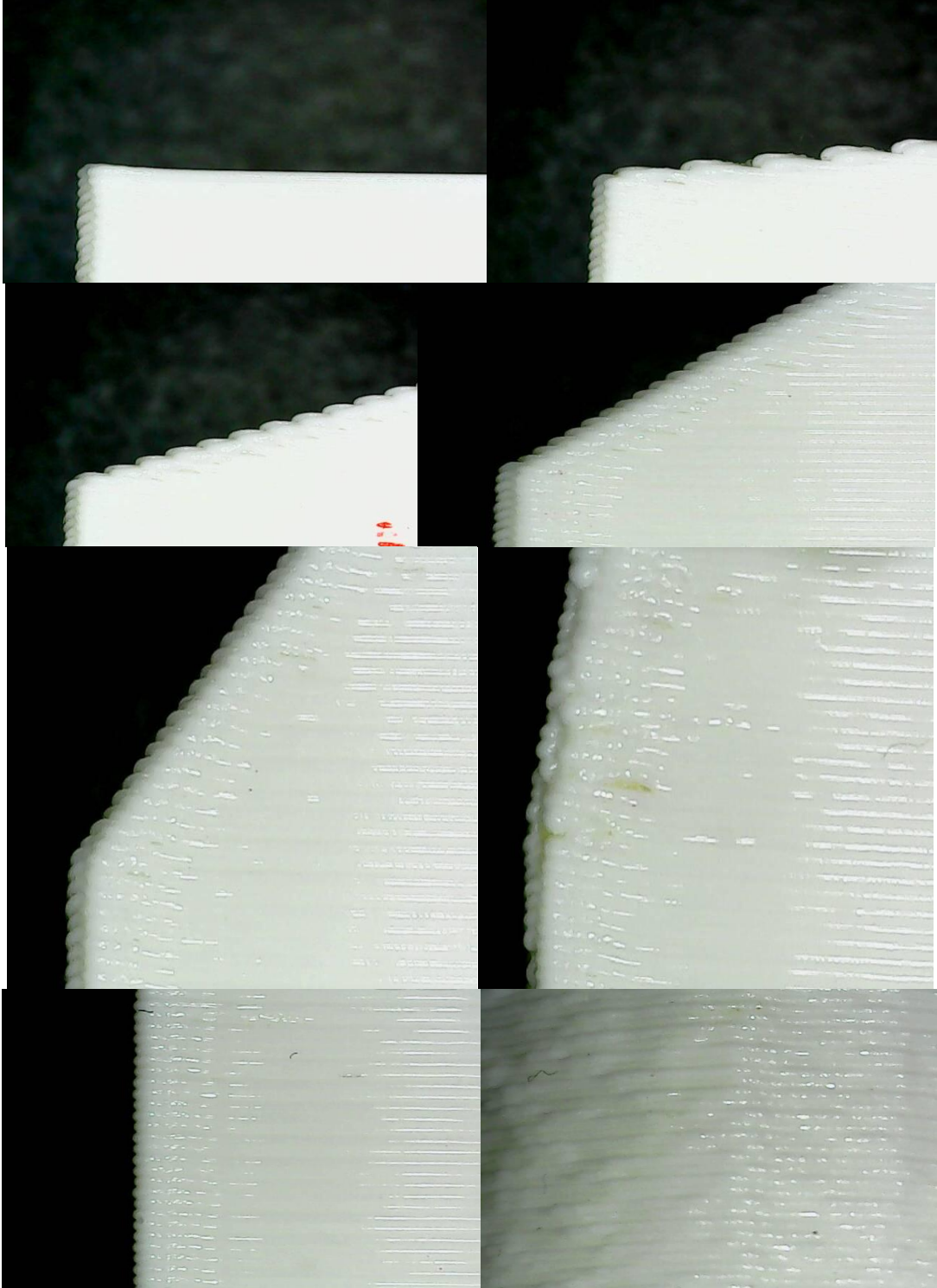
PET 0.15 mm



يبين الشكل (4) صور لعينة PET عند سماكة 0.15 mm

نلاحظ بداية ظهور الفقاعات عند رفع درجة الحرارة وحصول عدم تجانس .

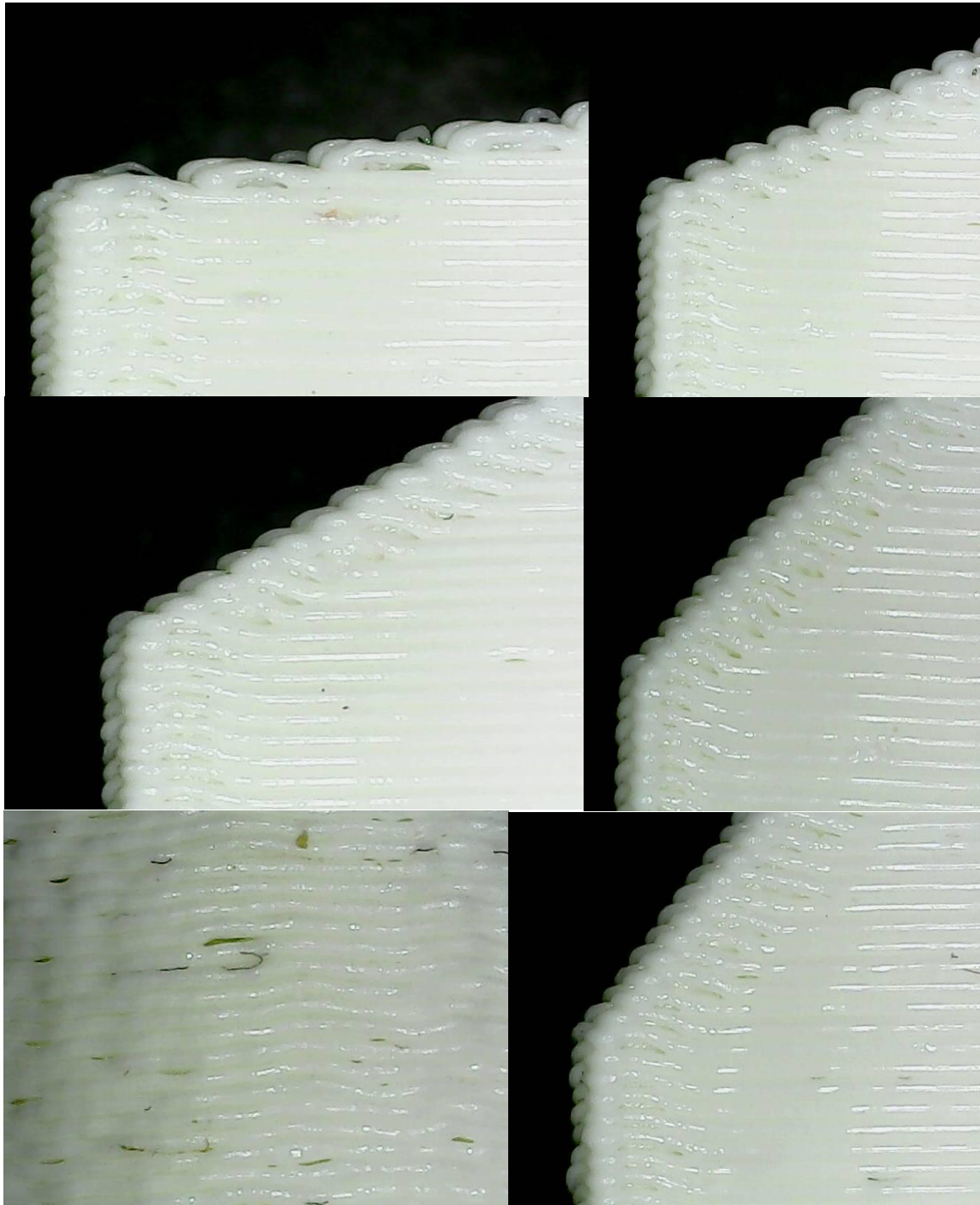
PET 0.25 mm



يبين الشكل (5) صور لعينة PET عند سماكة 0.25 mm

نلاحظ ظهور الفقاعات بشكل واضح عند تشكل السطح بسماكة أكبر عند رفع درجة الحرارة وحصول عدم تجانس.

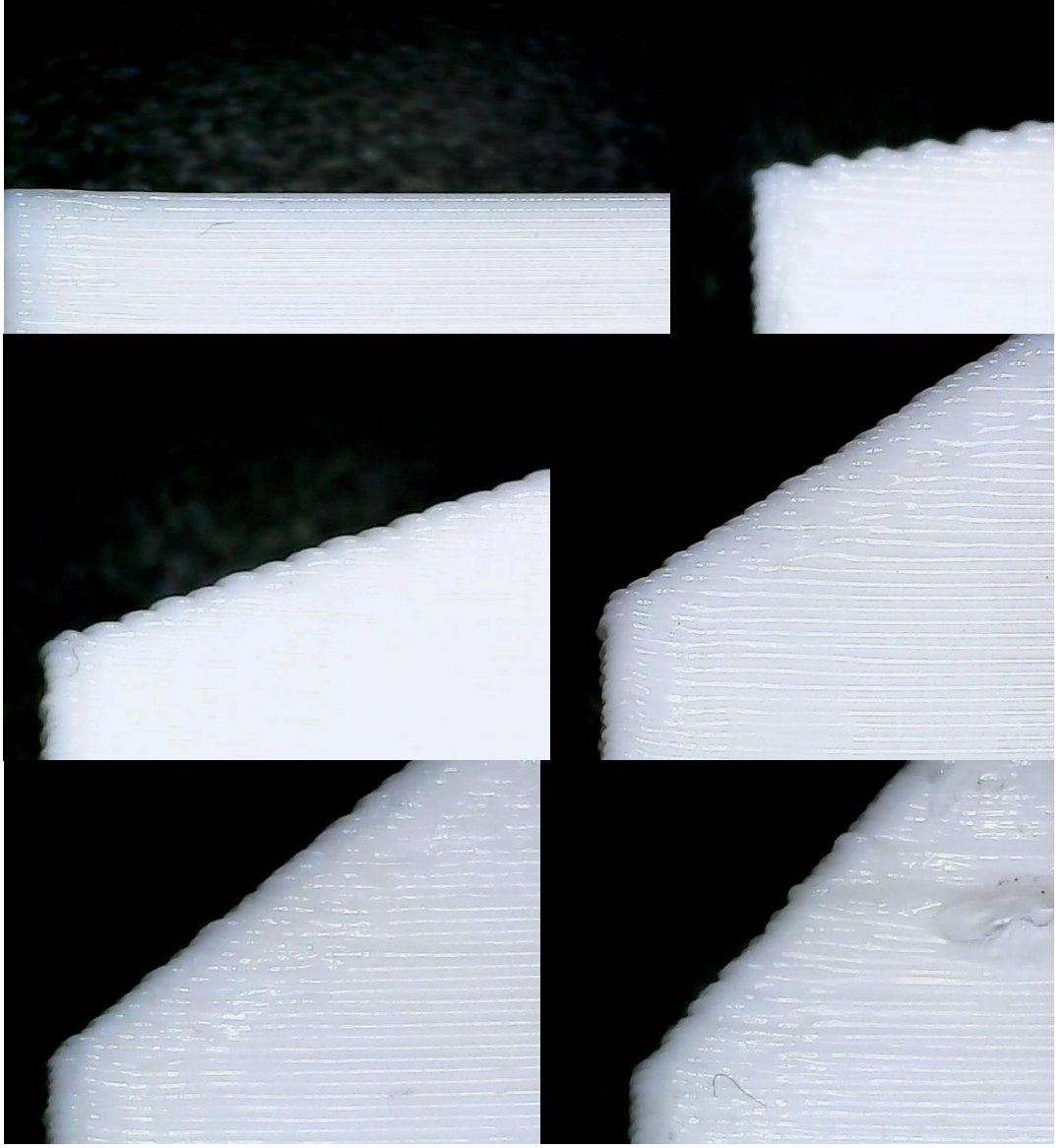
PET 0.35 mm



يبين الشكل (6) صور لعينة PET عند سماكة 0.35 mm

نلاحظ ظهور الفقاعات بشكل واضح عند تشكل السطح بسماكة أكبر عند رفع درجة الحرارة وحصول عدم تجانس.

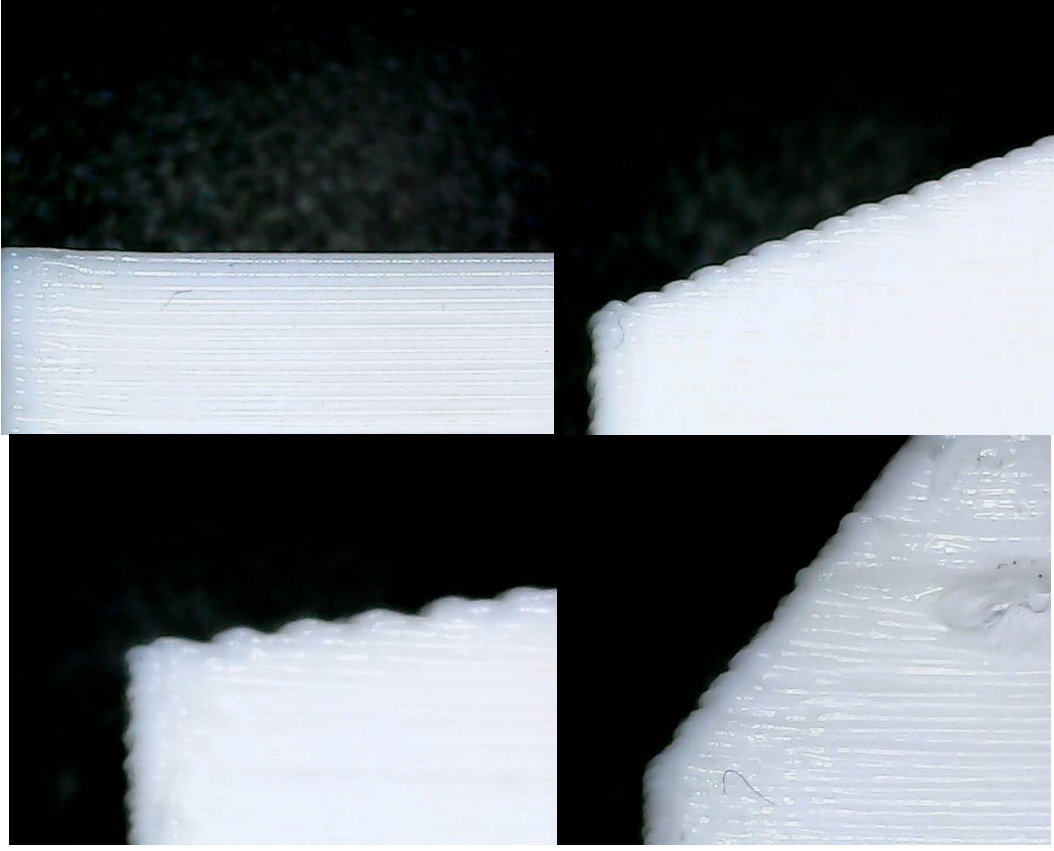
PLA 0.25 mm



يبين الشكل (7) صور لعينة PLA عند سماكة 0.15 mm

3- بالنسبة لمادة PLA كان من غير الممكن طباعة السماكة 0.15mm بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً  $210\text{ C}^{\circ}$  وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.

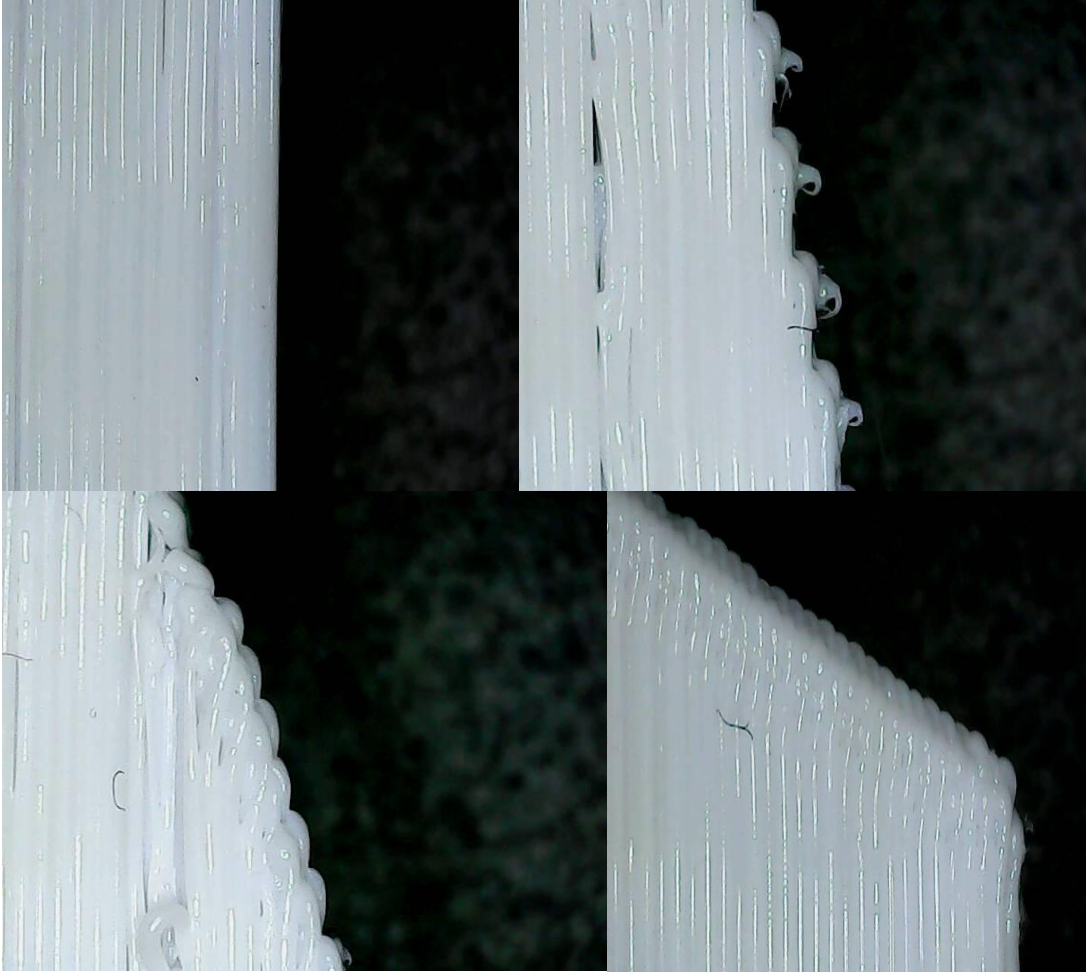
PLA 0.25 mm



يبين الشكل (8) صور لعينة PIA عند سماكة 0.25 mm

2- بالنسبة لمادة PLA كان من غير الممكن طباعة السماكة 0.25mm بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً  $210\text{ C}^{\circ}$  وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.

## PLA 0.35 mm

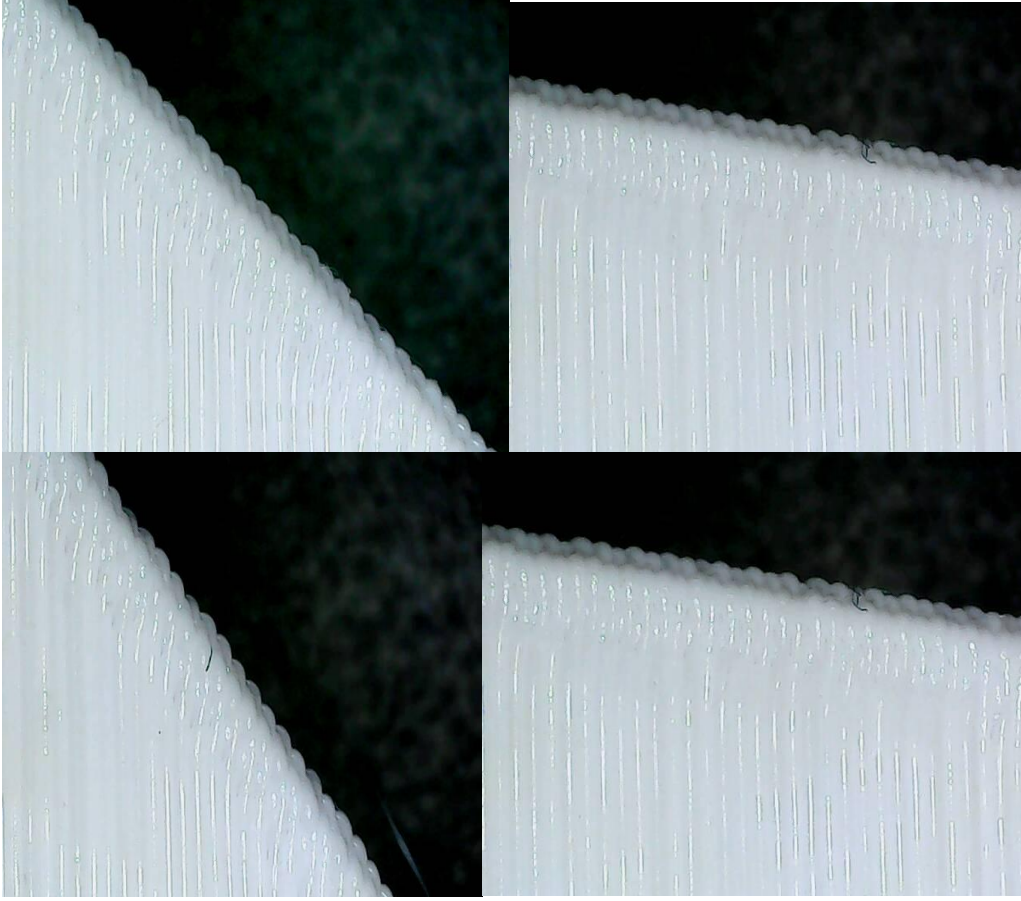


يبين الشكل (9) صور لعينة PIA عند سماكة 0.35 mm

2 - بالنسبة لمادة PLA كان من غير الممكن طباعة السماكة 0.35mm بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً  $210^{\circ}\text{C}$  وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.

3- بالنسبة لمادة PIA- pic كان من غير الممكن طباعة السماكة 0.35mm بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً  $210^{\circ}\text{C}$  وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.

pla.pic-0.35 mm

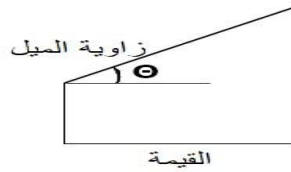


يبين الشكل (10) صور لعينة PIA- pic عند سماكة 0.35 mm

4- تم اختبار مادة PTEG عند درجة حرارة  $220^{\circ}\text{C}$  عند ثلاث قيم متتالية للسماكة

0.45-0.25-0.15mm على الترتيب بزوايا من  $0^{\circ}$  وحتى  $90^{\circ}$  حيث تمثل الزاوية  $0^{\circ}$

الوضع الأفقي , أما الزاوية 90o تمثل الوضع الشاقولي.



الشكل (12) زاوية الميل والقيمة

بعد الأبحاث الأخرى تعين من  $0^\circ$  وحتى  $180^\circ$  ، ولكن الزوايا من  $90^\circ$  وحتى  $180^\circ$  تمثل تكراراً للسطح من  $0^\circ$  إلى  $90^\circ$  ولكن باتجاه آخر ، لذلك تم الاكتفاء من  $0^\circ - 90^\circ$

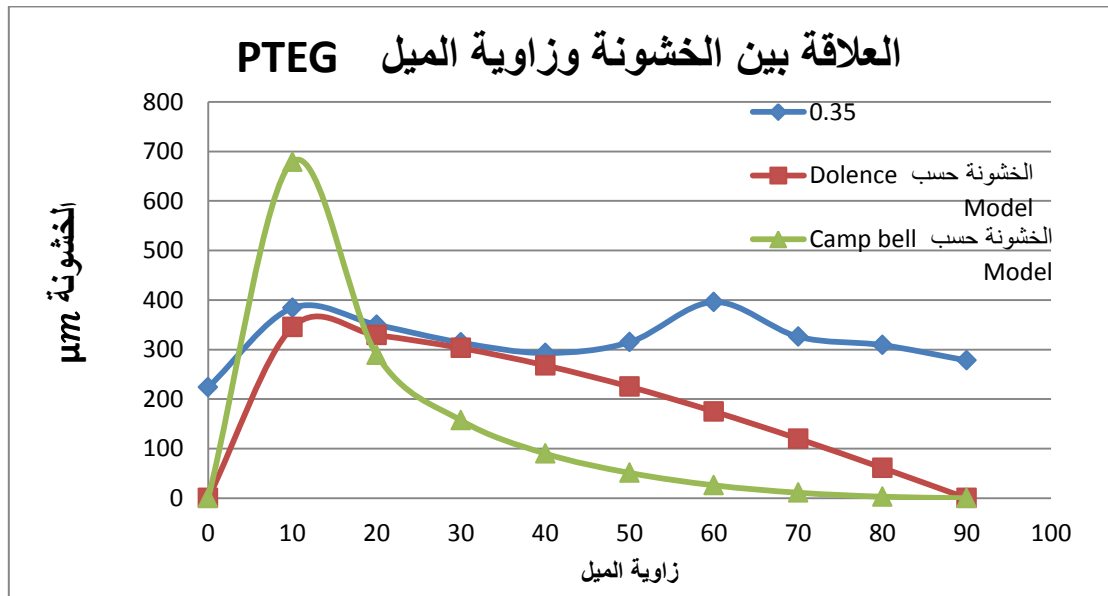
تم قياس الخشونة عن طريق جهاز برأس هرمي يقيس Ra الخشونة المتوسطة.

حيث يأخذ 9 قراءات متتالية لعمق الأوعية بالتتالي ويحسب المتوسط الحسابي للقراءات التسعة ويعطي الواحدة ب  $\mu m$ .

بعد قياس الخشونة تم قياس الأبعاد الأساسية للنموذج بمعرفة العلاقة بين الأبعاد الأسمية والأبعاد المخبرية للعينات وارتباطها بسماكة الطباعة تم أخذ كل بعد اسمي من ثلاث مناطق مختلفة بسبب ملاحظة حدوث تفاوت في الأبعاد من مكان لآخر.

## 6. 2. تأثير زاوية الميل على خشونة المشغولة وأبعادها مع تغير السماكة

1- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة  $0.35 \text{ mm}$  لمادة PTEG درجة الحرارة  $220^\circ$  :

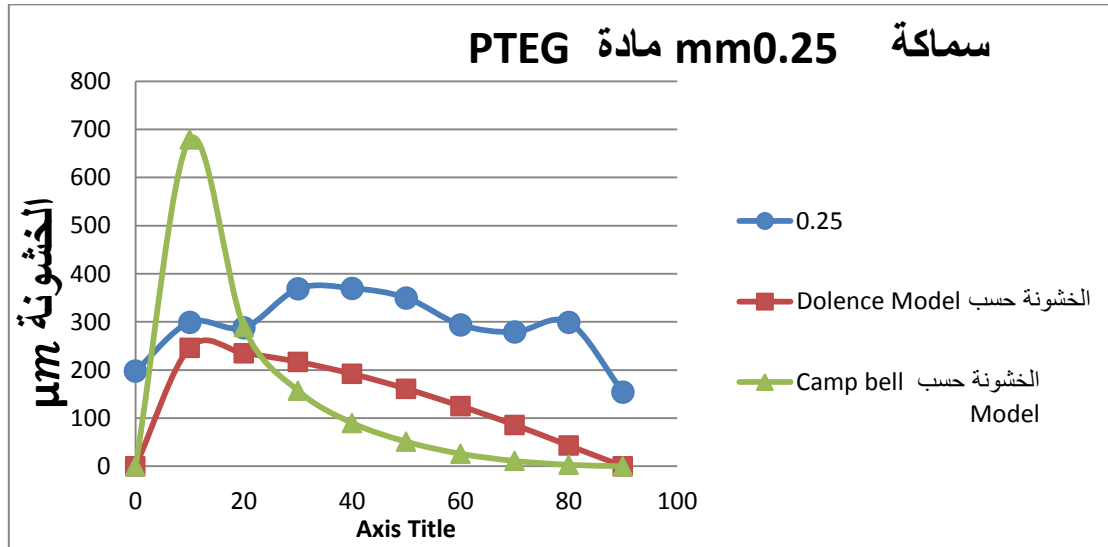


الشكل ( 1.6 ) الخشونة عند سماكة  $0.35 \text{ mm}$  مادة PTEG

تكون الخشونة أعظمية وذلك عند درجة , 60 ودرجة 10 كما هو موضح الشكل ( 1.6 )

2-العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة PTEG درجة

الحرارة  $220^{\circ}$



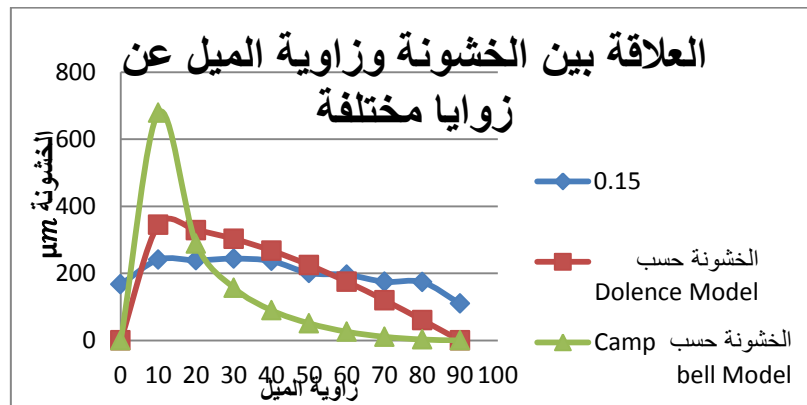
الشكل ( 2.6 ) الخشونة عند سماكة 0.25 mm مادة PTEG

تكون الخشونة أعظمية وذلك عند درجة ,  $40^{\circ}$  ودرجة  $30^{\circ}$  كما هو موضح الشكل ( 2.6 )

وتتخفض عند درجة  $20^{\circ}$  و  $70^{\circ}$ .

3-العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.15 mm لمادة PTEG درجة

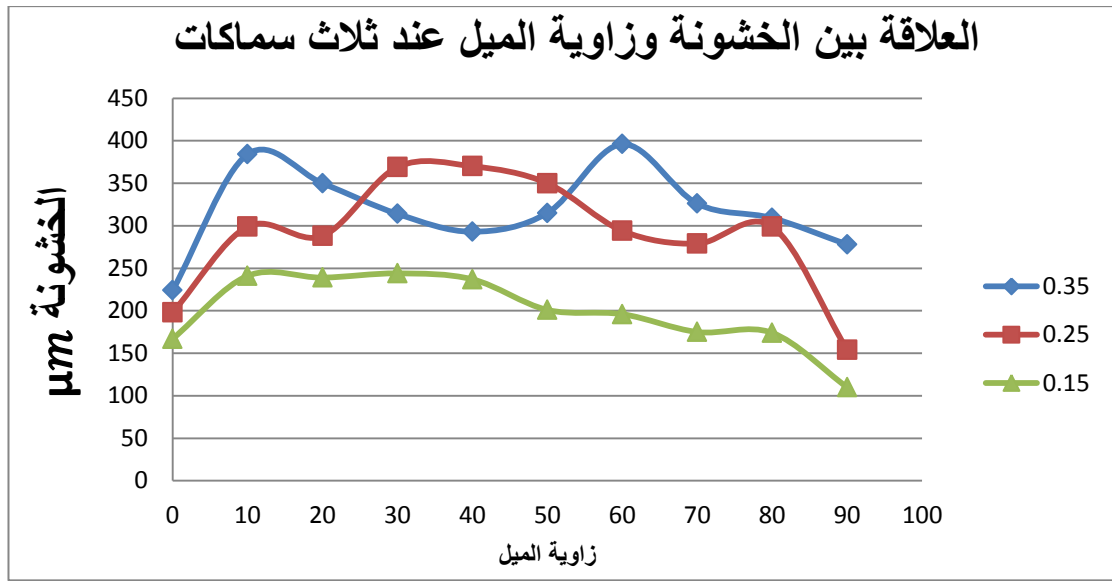
الحرارة  $220^{\circ}$



الشكل ( 3.6 ) الخشونة عند سماكة 0.15 mm مادة PTEG

تكون الخشونة أعظمية وذلك عند درجة ،  $10^{\circ}$  إلى  $40^{\circ}$  كما هو موضح الشكل ( 3.6 )  
وتتخفض عند درجة مع زيادة زاوية الميل .

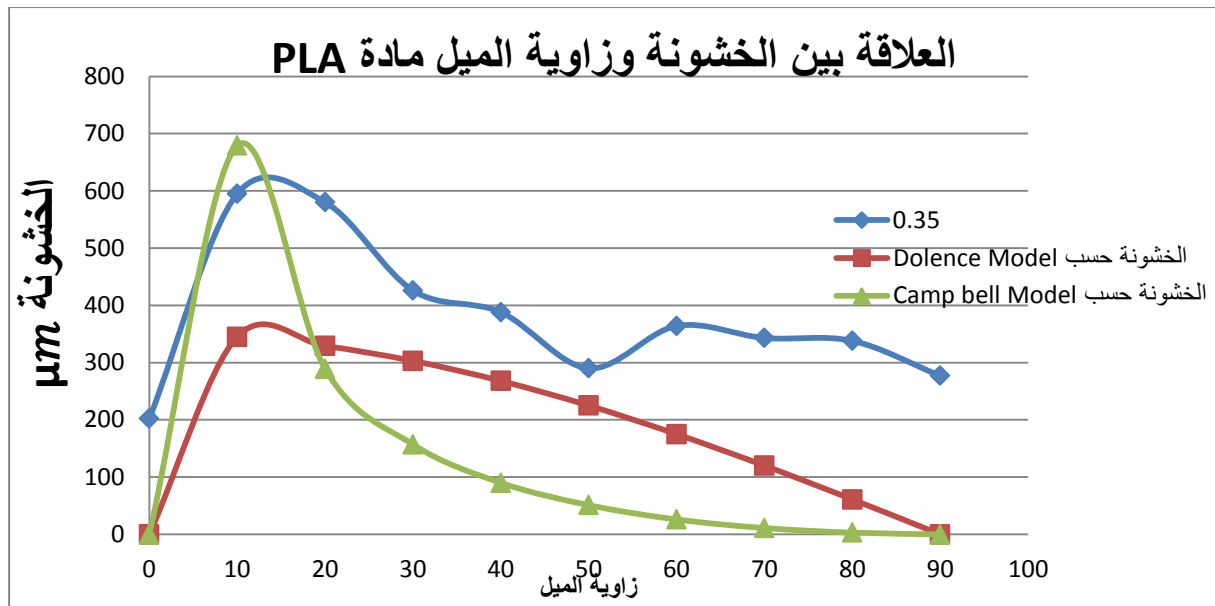
4-العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكات 0.35 mm و 0.25 mm  
و 0.15 mm لمادة PTEG درجة الحرارة  $220^{\circ}$



الشكل ( 4.6 ) الخشونة عند سماكة 0.35 mm, 0.15 mm 0.25 مادة PTEG

من الشكل ( 4.6 ) يتبين أن أفضل سماكة تقل فيها الخشونة هي 0.15 mm مقارنة بالسماكتين  
الباقيتين .

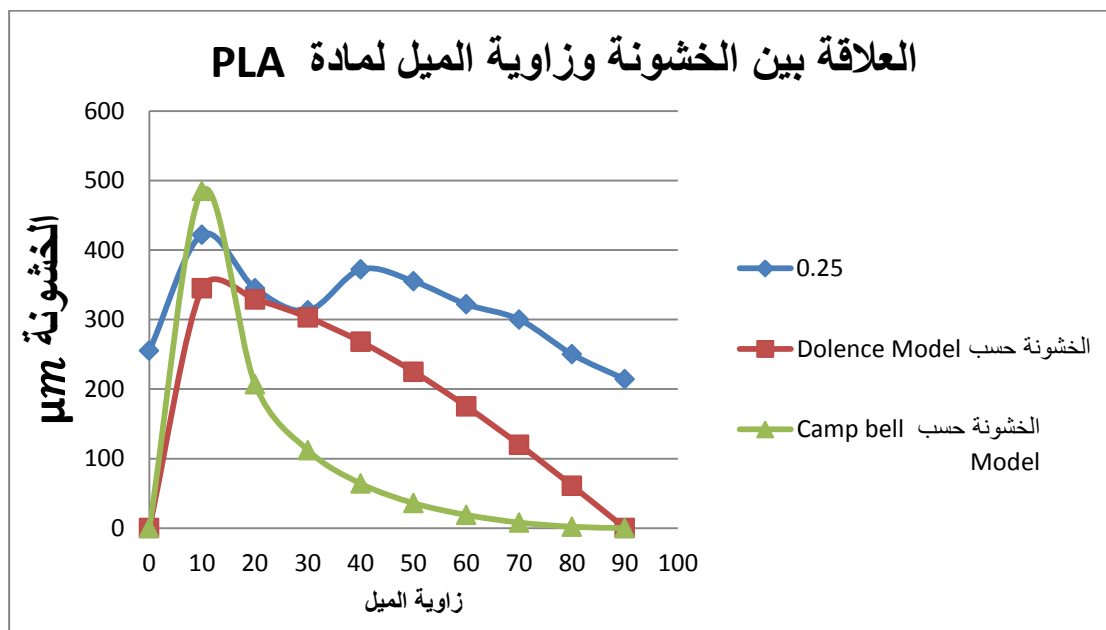
5- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.35 mm لمادة PLA درجة الحرارة  $220^{\circ}$



الشكل ( 5.6 ) الخشونة عند سماكة 0.35 mm , مادة PLA

تقترب الخشونة المقاسة من الخشونة حسب Dolence Model عند درجة  $10^\circ$  وتتناقص مع زيادة زاوية الميل .

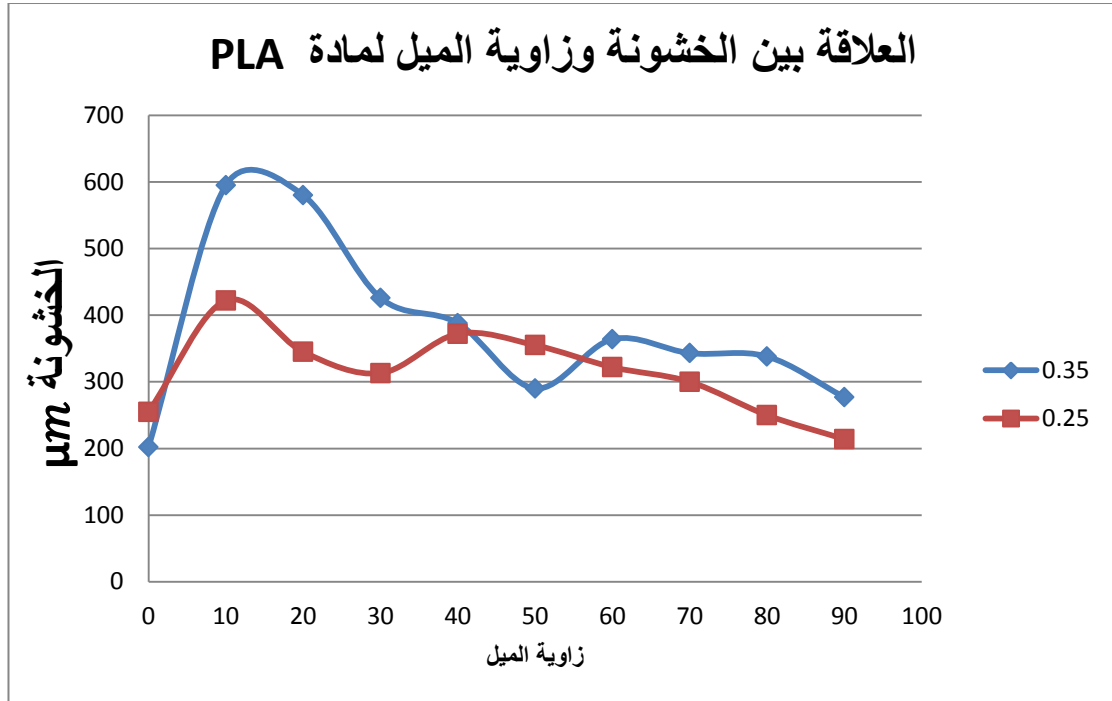
6- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة PLA درجة الحرارة  $220^\circ$



الشكل ( 6.6 ) الخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة PLA

تقترب الخشونة المقاسة من الخشونة حسب Dolence Model عند درجة  $10^\circ$  وتتناقص مع زيادة زاوية الميل .

7- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكات 0.35 mm و 0.25 mm لمادة PLA درجة الحرارة  $220^\circ$

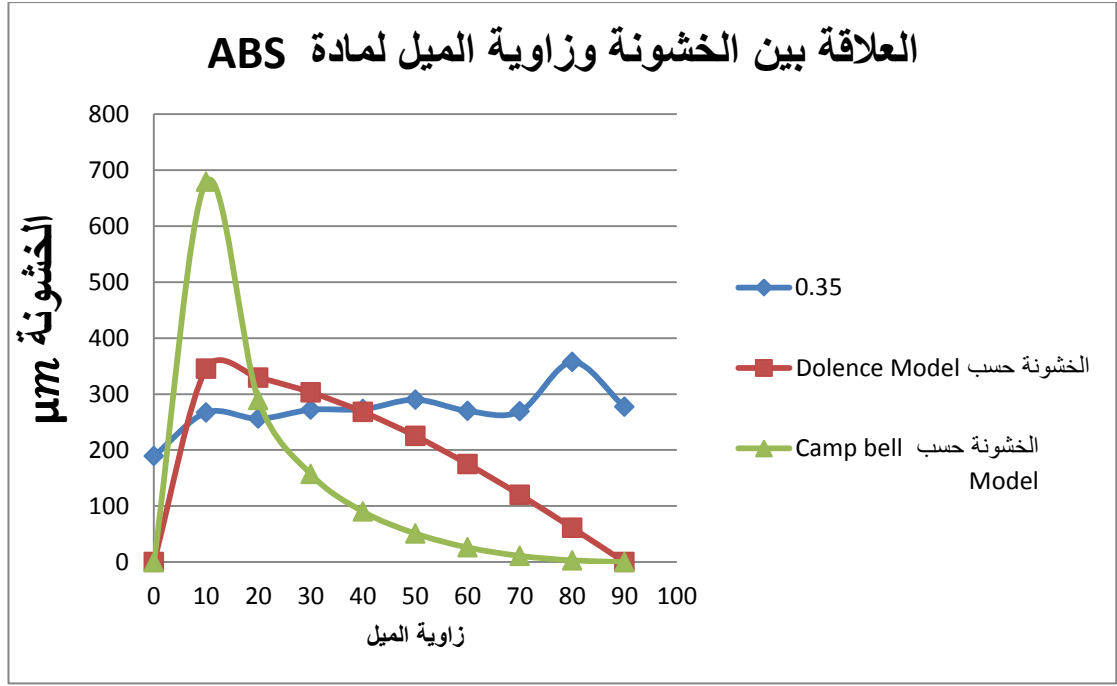


الشكل (7.6) الخشونة عند سماكة 0.25 mm ، 0.35 ، لمادة PLA

من النتائج يتبين ان الخشونة تتخفض مع انخفاض سماكة المادة .

8- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة ABS درجة الحرارة

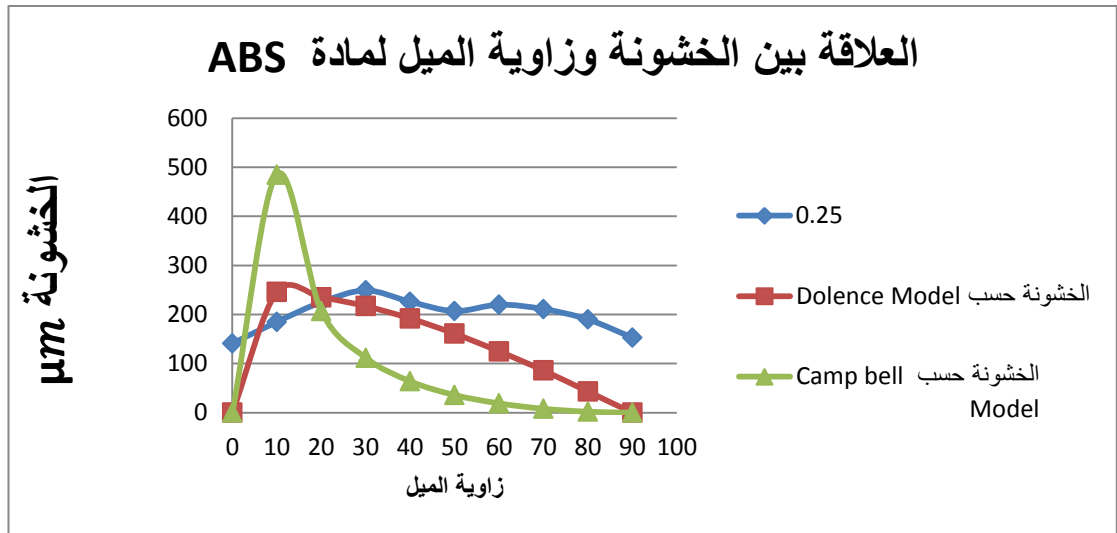
$250^\circ$



الشكل ( 8.6 ) الخشونة عند سماكة 0.35 mm لمادة ABS

تكاد الخشونة تكون شبه ثابتة مع تغير زاوية الميل وتبلغ ذروتها عند زاوية  $80^{\circ}$  .

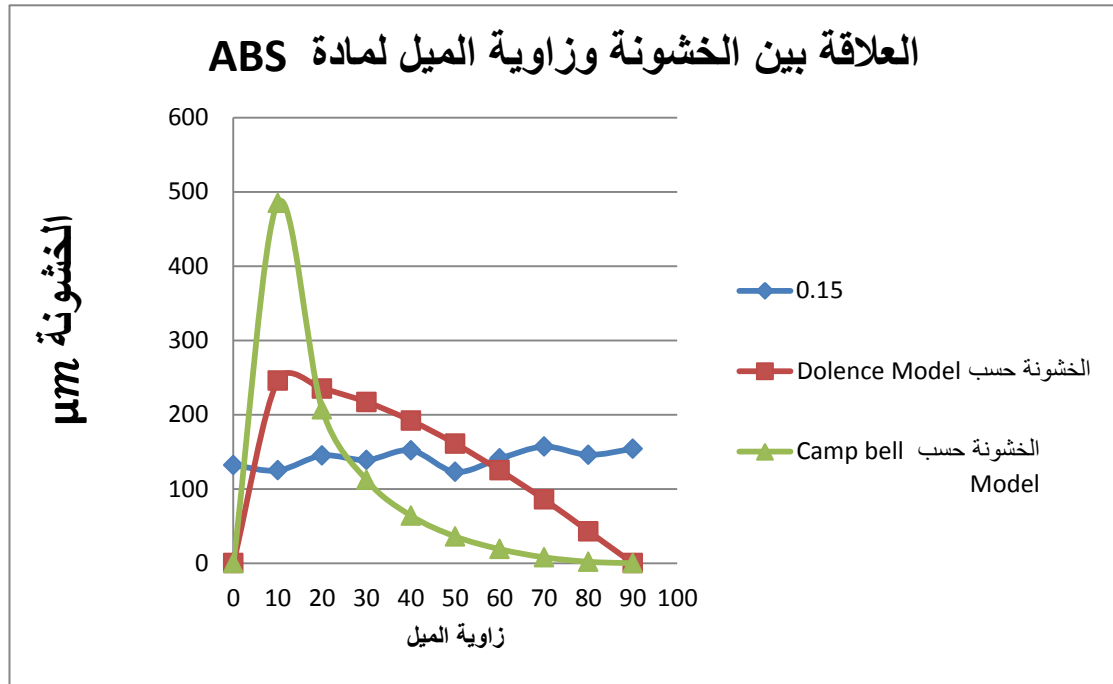
9- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة ABS درجة الحرارة  $250^{\circ}$



الشكل ( 9.6 ) الخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة ABS

تكاد الخشونة تكون شبه ثابتة مع تغير زاوية الميل وتبلغ ذروتها عند زاوية  $30^{\circ}$  .

10- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.15 mm لمادة ABS درجة الحرارة 250 °

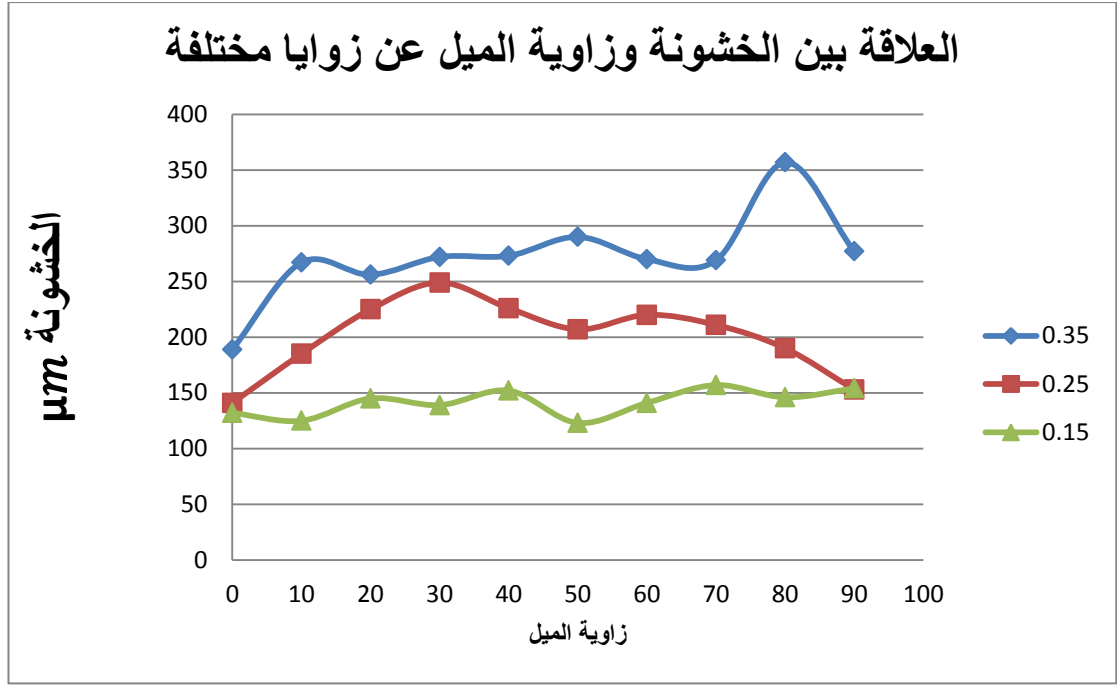


الشكل (10.6) الخشونة عند سماكة 0.15 mm لمادة ABS

تكاد الخشونة تكون شبه ثابتة مع تغير زاوية الميل وتتنخفض عند زاوية 50° .

11- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكات 0.15 mm و 0.25 mm و 0.35 mm

لمادة ABS درجة الحرارة 250 °

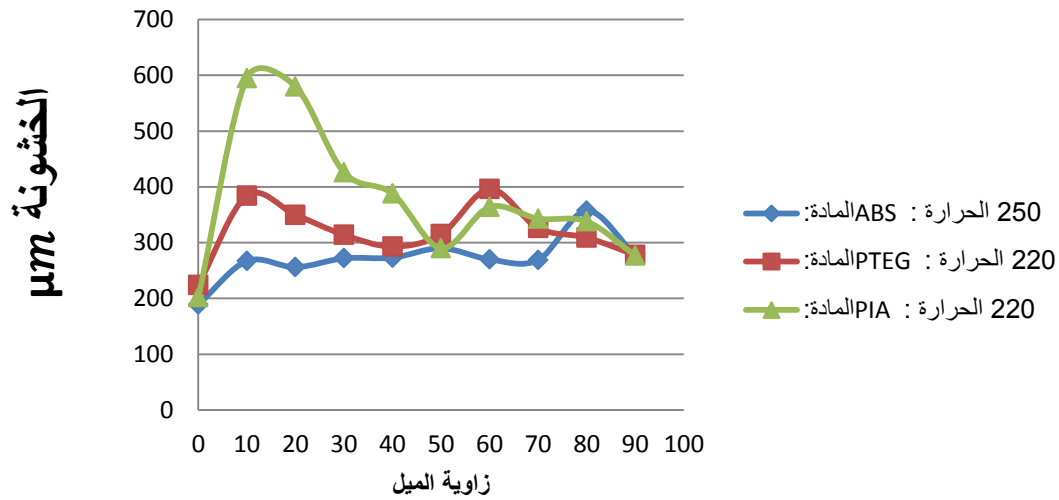


الشكل ( 11.6 ) الخشونة عند سماكة 0.25 mm ، 0.15 mm ، 0.35 mm ،

كما تبين بالنتائج السابقة فإن الخشونة تتناقص مع انخفاض السماكة في حالة مادة ABS فإن الخشونة تكون شبيه ثابتة ولا تتأثر بشكل كبير بزاوية الميل .

-12 العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.35 mm للمواد ABS ,PTEG, PLA

### العلاقة بين الخشونة وزاوية الميل عن زوايا للمواد ABS ,PTEG, PLA

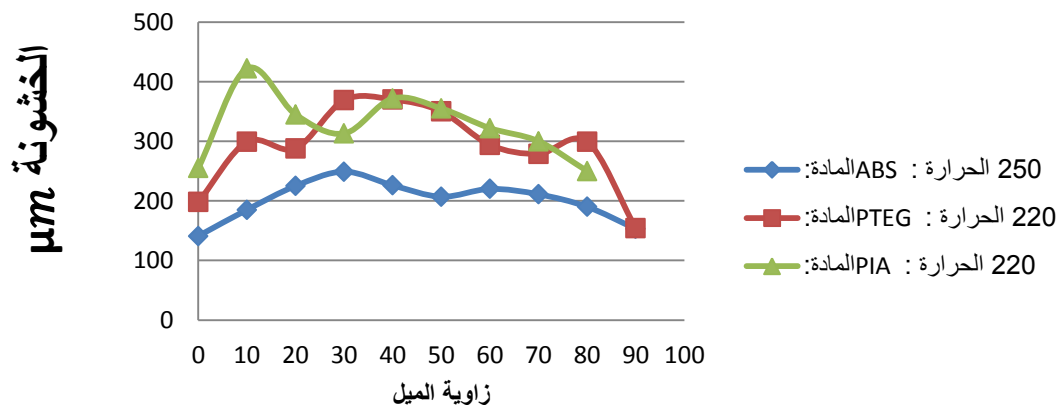


الشكل ( 12.6 ) الخشونة عند سماكة 0.35 mm للمواد المستخدمة

تبين من الشكل ( 12.6 ) مادة ABS هي أفضل مادة عند السماكة 0.35 mm

13- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.25 mm للمواد ABS ,PTEG, PLA

### العلاقة بين الخشونة وزاوية الميل للمواد ABS ,PTEG, PLA

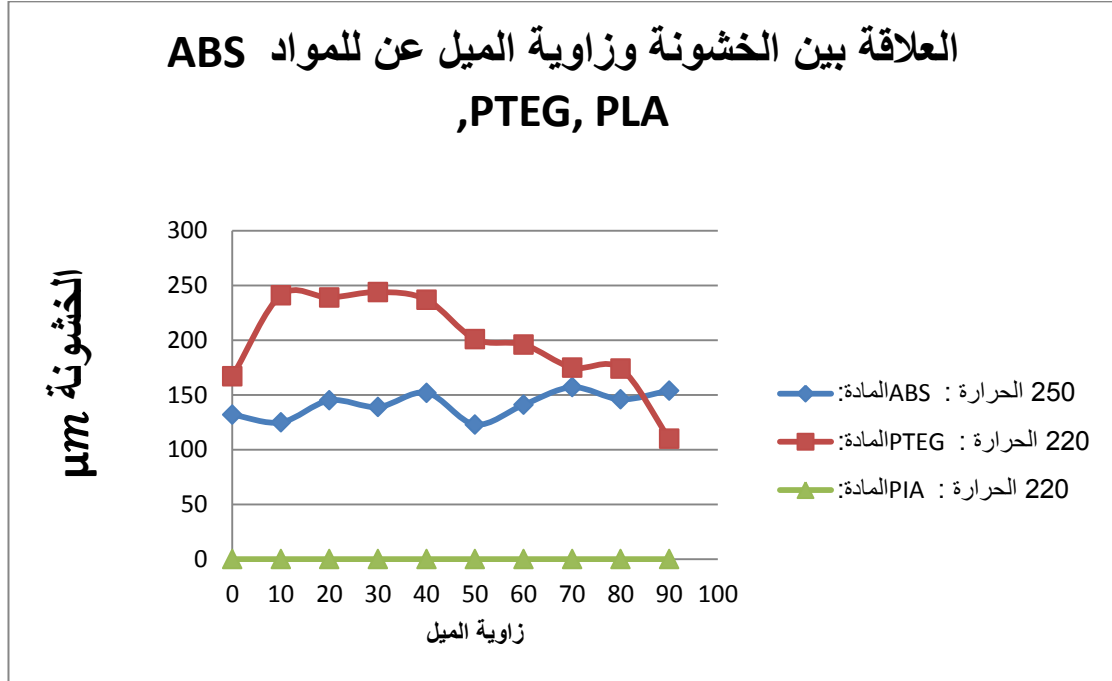


الشكل ( 13.6 ) الخشونة عند سماكة 0.35 mm للمواد المستخدمة

تبيين من الشكل ( 13.6 ) مادة ABS هي أفضل مادة عند السماكة 0.25 mm

14- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.15 mm للمواد PTEG,

PLA

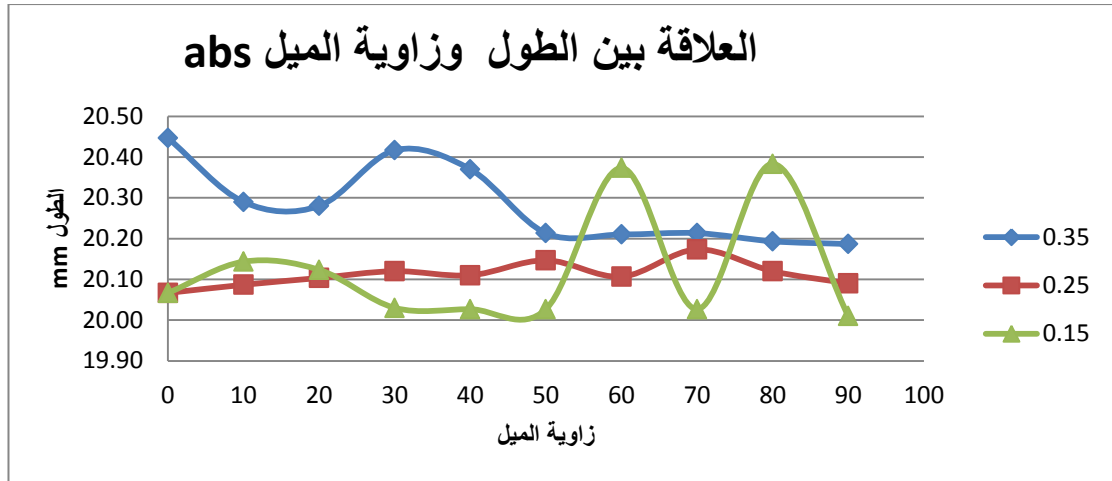


الشكل ( 14.6 ) الخشونة عند سماكة 0.25 , 0.15 mm , 0.35 ,

تبيين من الشكل ( 14.6 ) مادة ABS هي أفضل مادة عند السماكة 0.15 mm

15- العلاقة بين زاوية الميل والأبعاد (الطول ) عند سماكات 0.35 mm و

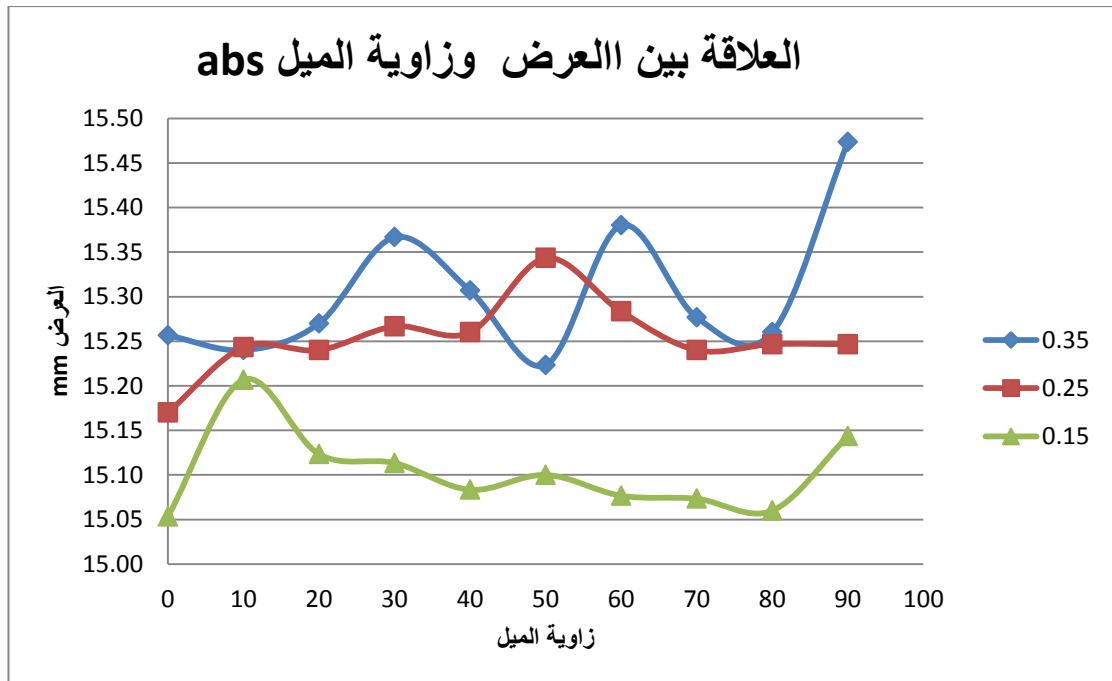
0.25 mm و 0.15 mm لمادة ABS درجة الحرارة 250 °



الشكل ( 15.6 ) الطول عند سماكة 0.25 mm ، 0.15 ، 0.35 ،

من الشكل يتبين أن طول المشغولة يبتعد عن الطول الأسمي 20 mm مع زيادة السماكة وخاصة عند 0.35 mm

16- العلاقة بين زاوية الميل والأبعاد (العرض) عند سماكات 0.35 mm و 0.25 mm و 0.15 mm لمادة ABS درجة الحرارة 250 °

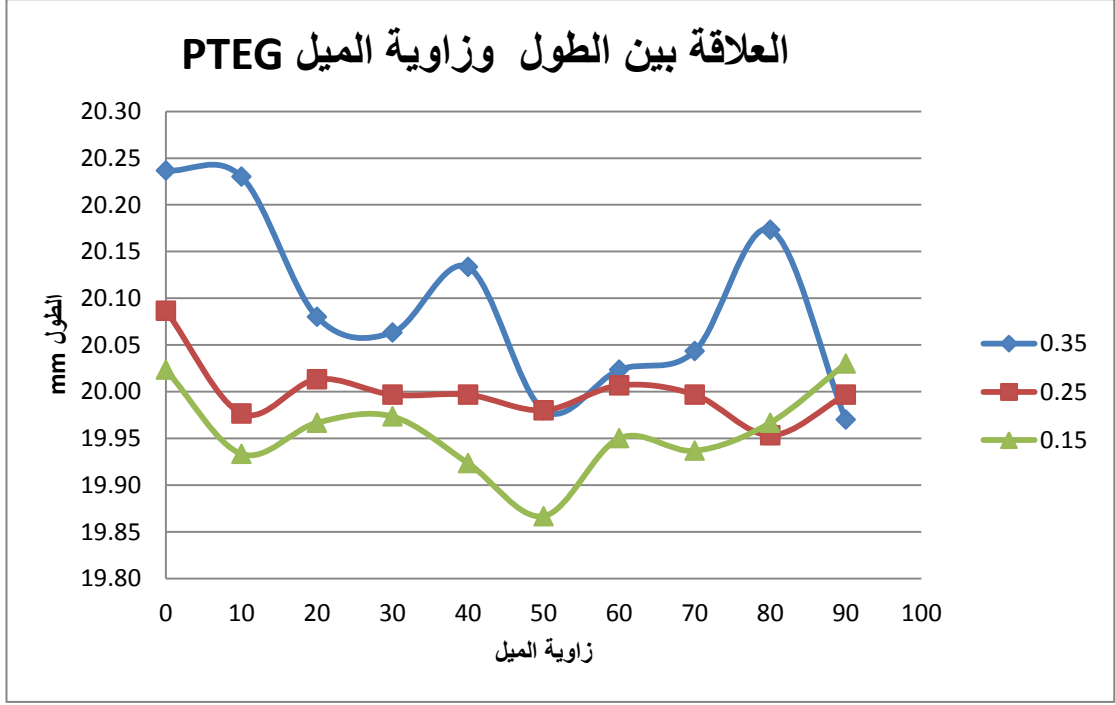


الشكل ( 4.6 ) الخشونة عند سماكة 0.25 mm ، 0.15 ، 0.35 ،

من الشكل يتبين أن عرض المشغولة يبتعد عن العرض الأسمي 15 mm مع زيادة السماكة

17- العلاقة بين زاوية الميل والأبعاد (الطول) عند سماكات 0.35 mm و

0.25 mm و 0.15 mm لمادة PTEG درجة الحرارة  $220^{\circ}$

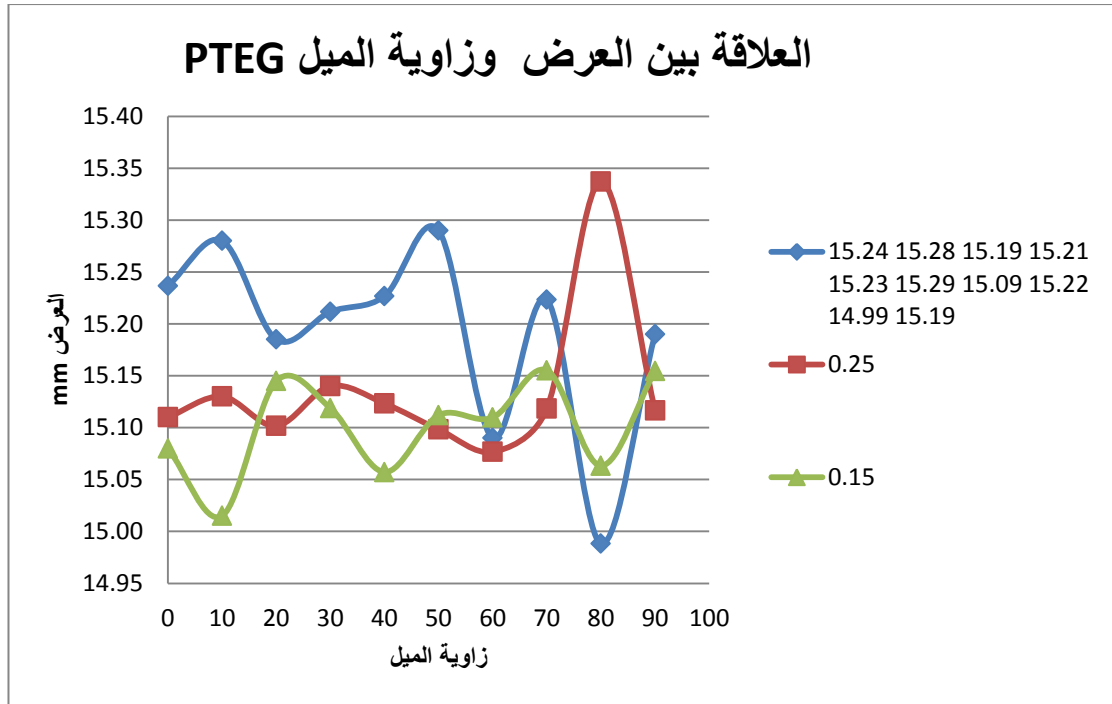


الشكل ( 4.6 ) الخشونة عند سماكة 0.25 mm ، 0.15 mm ، 0.35 ،

من الشكل يتبين أن طول المشغولة يبتعد عن الطول الأسمي 20 mm مع زيادة السماكة

18- العلاقة بين زاوية الميل والأبعاد (العرض) عند سماكات 0.35 mm و

0.25 mm و 0.15 mm لمادة PTEG درجة الحرارة  $220^{\circ}$  .

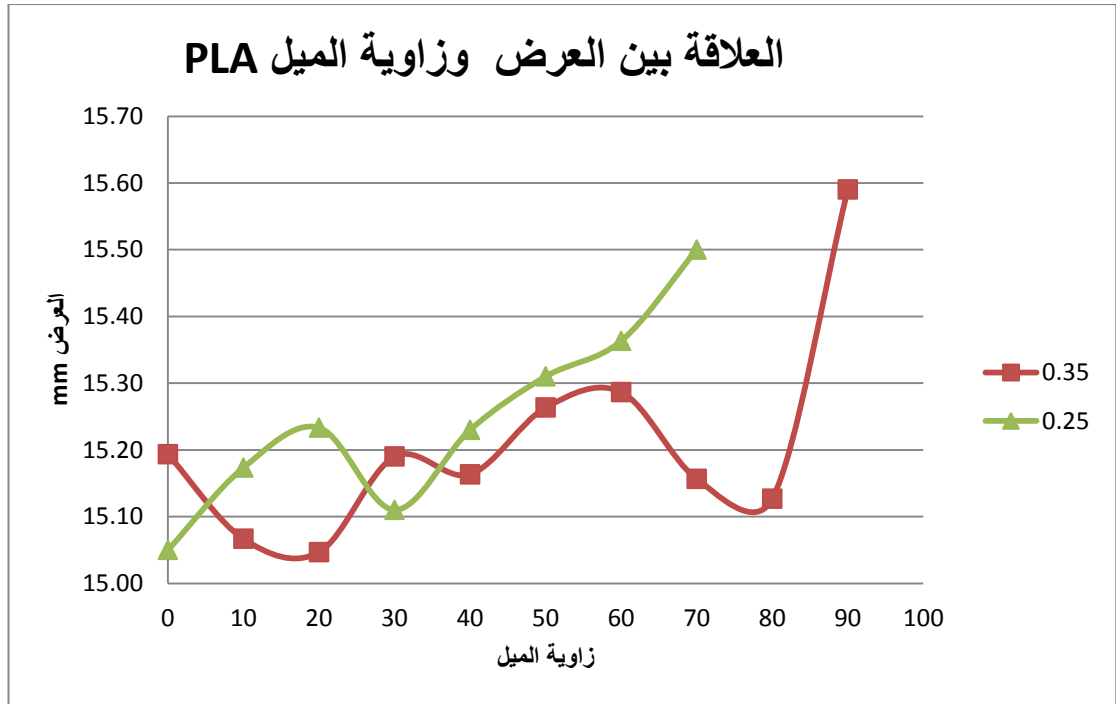


الشكل (4.6) الخشونة عند سماكة 0.25 mm ، 0.15 ، 0.35 ،

من الشكل يتبين أن العرض المشغولة يبتعد عن العرض الأسمي 15 mm مع زيادة السماكة

19- العلاقة بين زاوية الميل والأبعاد (العرض) عند سماكات 0.35 mm و

0.25 mm و 0.15 mm لمادة PLA درجة الحرارة 220 °

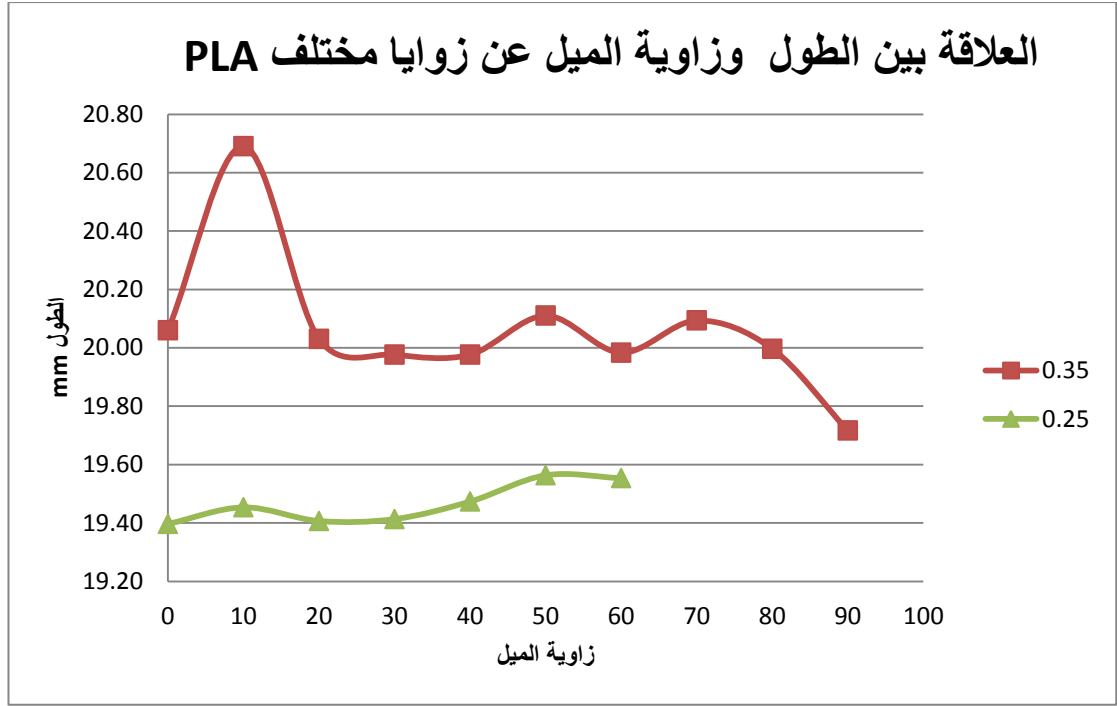


الشكل (4.6) العرض عند سماكة 0.25 mm ، 0.15 mm ، 0.35 ،

من الشكل يتبين أن عرض المشغولة يبتعد عن العرض الأسمي 15 mm مع زيادة السماكة

20- العلاقة بين زاوية الميل والأبعاد ( العرض ) عند سماكات 0.35 mm و 0.25 mm و

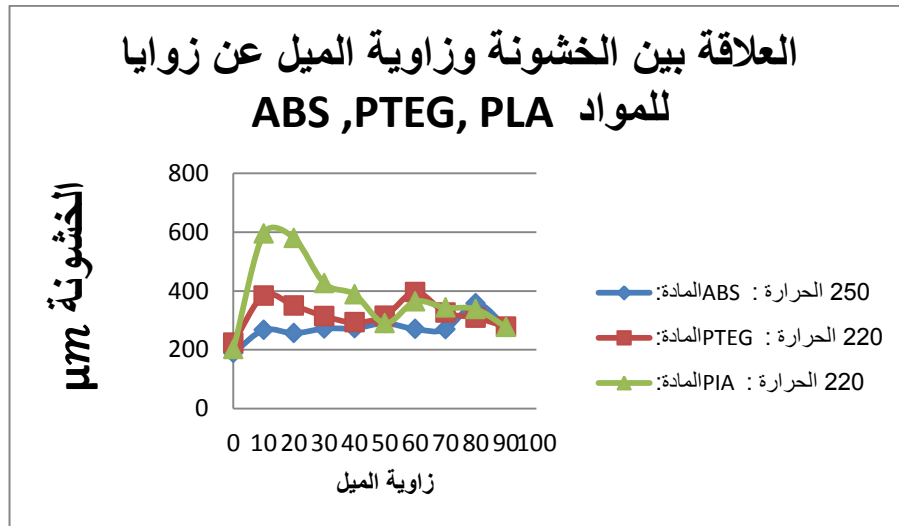
0.15 mm لمادة PLA درجة الحرارة 220 °C



الشكل (4.6) الخشونة عند سماكة 0.25 mm ، 0.15 mm ، 0.35 ،

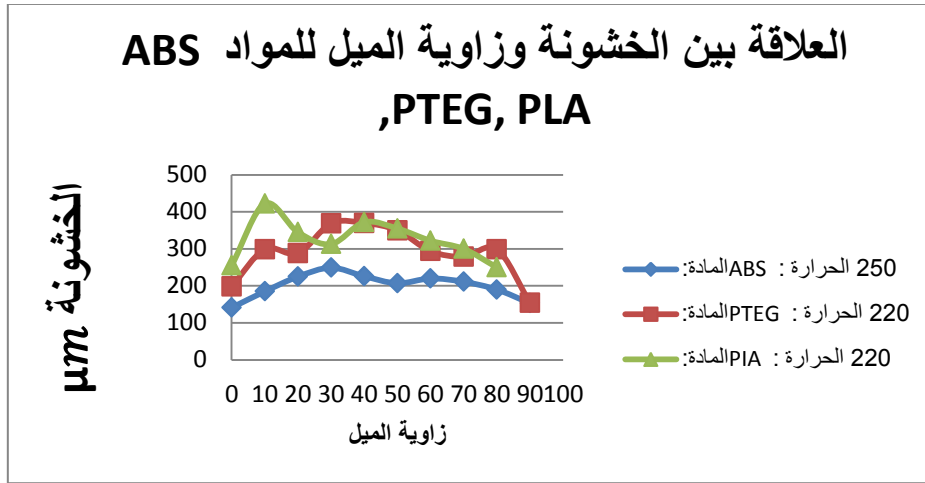
من الشكل يتبين أن طول المشغولة يبتعد عن الطول الأسمي 20 mm مع زيادة السماكة

1- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.35 mm للمواد ABS ,PTEG, PLA



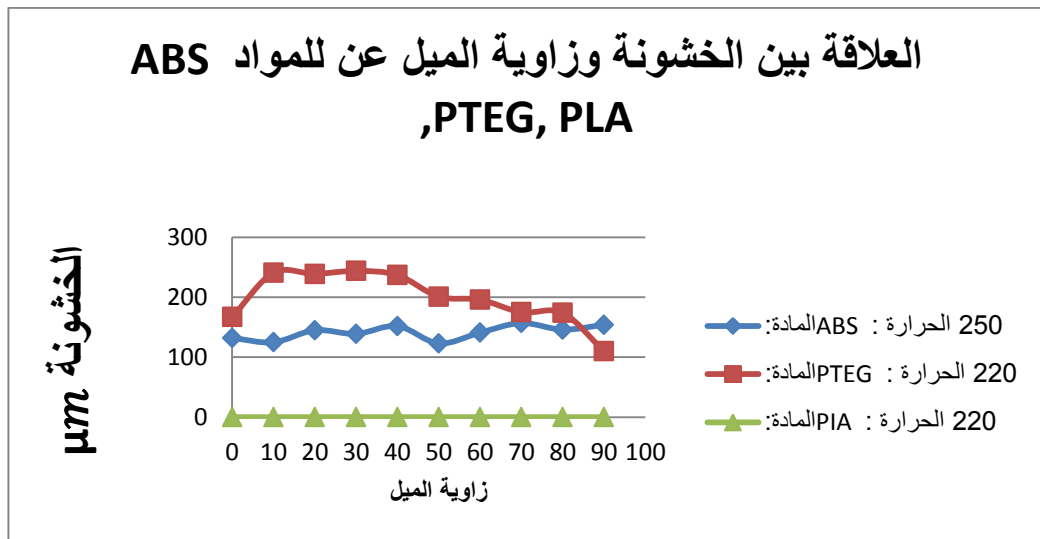
الشكل (13) الخشونة عند سماكة 0.35 mm للمواد المستخدمة

2- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.25 mm للمواد ABS ,PTEG, PLA



الشكل ( 14 ) الخشونة عند سماكة 0.25 mm للمواد المستخدمة

3- العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.15 mm للمواد PTEG, PLA

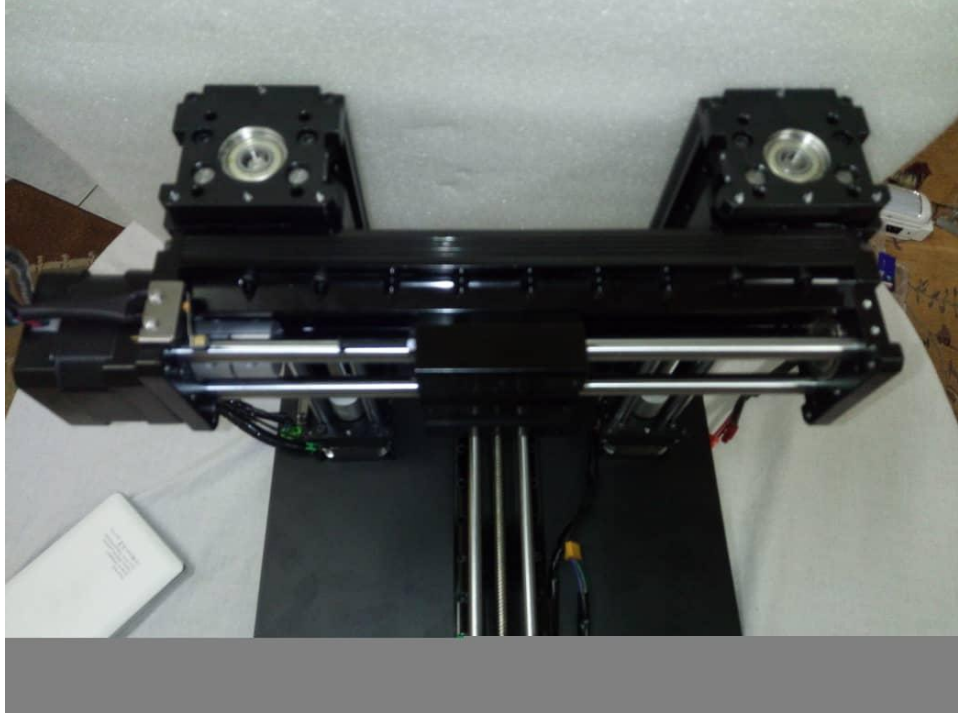


الشكل ( 15 ) الخشونة عند سماكة 0.25 , 0.15 mm , 0.35

ويعزى هذا التغير إلى حدوث انفعالات حرارية وتشوهات عند بثق البوليمر ، والذي يتأثر بدوره بحرارة السرير وحرارة رأس البثق وسرعة الطباعة.

## النتائج:

- 1- تبين الأشكال السابقة أن مادة ABS هي أفضل مادة عند السماكات المختلفة المدروسة .  
وبعزى هذا التغيير في الخشونة للمواد المدروسة إلى حدوث انفعالات حرارية وتشوهات عند بثق البوليمر ، والذي يتأثر بدوره بحرارة السرير وحرارة رأس البثق وسرعة الطباعة.
- 2- بالنسبة لمادة PLA كان من غير الممكن طباعة السماكة mm0.15 بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً Co 210 وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.
- 3- بخصوص مادة PETG لوحظ ظهور فقاعات عند رفع درجة الحرارة فوق Co220 وحصول عدم تجانس .أما خفض الحرارة فأدى إلى عينات مشوهة وحصول انسداد متكرر.
- 4- بالنسبة لمادة ABS كانت أفضل جودة عند درجة حرارة Co250 ولم نتمكن من الطباعة عند Co220 بسبب زيادة القوى المطلوبة بشكل كبير جداً وحصول انسدادات متكررة.
- 5- تبين من قياس الخشونة أن مادة ABS هي أفضل مادة عند السماكات المختلفة . وبالتالي هي المادة الأفضل للدراسة .
- 6- تعمل حرارة السرير على تسهيل التصاق طبقات البوليمر بعضها ببعض بالإضافة إلى تخفيض التشوهات قدر الإمكان بسبب فرض عملية تبريد متجانس لكامل القطعة المراد طباعتها ولكن الهدف الأساسي هو رفع الحرارة إلى ما فوق حرارة الخول الزجاجي.



الشكل (16) آلة الطباعة ثلاثية الأبعاد المصممة

## الاستنتاجات

- 1- تم في هذا البحث دراسة تأثير درجة الحرارة لمادة ABS الأكريلونيتريل - بوتادين - ستيرين فكانت أفضل جودة عند درجة حرارة 250°C ولم نتمكن من الطباعة عند 220°C بسبب زيادة القوى المطلوبة بشكل كبير جداً وحصول انسدادات متكررة.
- 2- عند دراسة تأثير درجة الحرارة لمادة PETG لوحظ ظهور فقاعات عند رفع درجة الحرارة فوق 220°C وحصول عدم تجانس. أما خفض الحرارة فأدى إلى عينات مشوهة وحصول انسداد متكرر.
- 3- عند دراسة تأثير درجة الحرارة لمادة PLA كان من غير الممكن طباعة السماكة 0.15mm بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً 210 °C وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.
- 4- بالنسبة لمادة PLA كان من غير الممكن طباعة السماكة 0.25mm بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً 210°C وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.
- 5- بالنسبة لمادة PLA كان من غير الممكن طباعة السماكة 0.35mm بسبب حصول انسداد متكرر لرأس البثق الحراري وذلك بسبب الطباعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً 210 °C وعدم القدرة على رفع درجة الحرارة.
- 6- عند دراسة العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.35 mm لمادة PTEG درجة الحرارة 220 لوحظ أن تكون الخشونة أعظمية وذلك عند درجة 60 ودرجة 10.
- 7- عند دراسة العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.15 mm لمادة PTEG درجة الحرارة 220 لوحظ أن تكون الخشونة أعظمية وذلك عند درجة 40 ودرجة 10.
- 8- عند دراسة العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكات 0.35 mm و 0.25 mm و 0.15 mm لمادة PTEG درجة الحرارة 220 لوحظ أن أفضل سماكة تقل فيها الخشونة هي 0.15 mm مقارنة بالسماكتين الباقيتين.
- 9- عند دراسة العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.35 mm لمادة PLA درجة الحرارة 220 لوحظ أن الخشونة عند درجة 100 تتناقص مع زيادة زاوية الميل .
- 10- عند دراسة العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.25 mm لمادة ABS درجة الحرارة 250 لوحظ أن الخشونة تكون شبه ثابتة مع تغير زاوية الميل وتبلغ ذروتها عند زاوية 80° .

- 11- عند دراسة العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكات 0.15 mm و 0.25 mm و 0.35 mm لمادة ABS درجة الحرارة  $250^{\circ}$  لوحظ أن الخشونة تتناقص مع انخفاض السماكة في حالة مادة ABS فالخشونة تكون شبه ثابتة ولا تتأثر بشكل كبير بزاوية الميل .
- 12- عند دراسة العلاقة بين زاوية الميل والخشونة عند سماكة 0.35 mm للمواد PTEG, PLA, ABS لوحظ أن مادة ABS هي أفضل مادة عند السماكة 0.35 mm.
- 13- إن مادة ABS هي أفضل مادة عند السماكات المختلفة المدروسة . ويعزى هذا التغير في الخشونة للمواد المدروسة إلى حدوث انفعالات حرارية وتشوهات عند بثق البوليمير ، والذي يتأثر بدوره بحرارة السرير وحرارة رأس البثق وسرعة الطباعة.

## التوصيات

- 1- عند الطباعة ثلاثية الأبعاد يجب الأخذ بعين الاعتبار نوع مادة النموذج , فقد تكون مادة بوليميرية أو معدنية أو مادة سيراميكية أو مواد مركبة.
- 2- عند الطباعة ثلاثية الأبعاد يجب الأخذ بعين الاعتبار درجة حرارة السرير من أجل الحصول على منتج غير مشوه .
- 3- عند الطباعة ثلاثية الأبعاد يجب الأخذ بعين الاعتبار درجة حرارة المناسبة التي يتم طباعة المنتج عندها للحصول على منتج مناسب ذو متانة عالية.
- 4- عند الطباعة ثلاثية الأبعاد يجب الأخذ بعين الاعتبار درجة حرارة السرير وحرارة رأس البثق وسرعة الطباعة لأن حرارة السرير تعمل على تسهيل التصاق طبقات البوليمير بعضها ببعض بالإضافة إلى تخفيض التشوهات قدر الإمكان بسبب فرض عملية تبريد متجانس لكامل القطعة المراد طباعتها.
- 5- لا تعد تقانة النمذجة ثلاثية الأبعاد بديلاً عن آلة التشغيل المبرمجة (CNC), وذلك لأن دقة آلات التشغيل المبرمجة أعلى بكثير من دقة الطباعة ثلاثية الأبعاد كما ويمكن تشغيل مواد متنوعة من معدنية وبوليميرية أو حتى سيراميكية.

## المراجع

1. LEE, Byoung Hun; ABDULLAH, J.; KHAN, Zahid A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. Journal of materials processing technology, 2005, 169.1: 54-61
2. K. Thrimurthulu a, Pulak M. Pandey b, N. Venkata Reddy, Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling, 2003.
3. Nikola Šimunić, Tihomir Mihalić, Ana Fudurić, Davor Tomić, DIMENSIONAL ACCURACY OF PROTOTYPES MADE WITH FDM TECHNOLOGY, 2017.
4. Xin Li, Zhuo Wang, Jianzhong Shang, RESEARCH ON THE WARPING DEFORMATION IN FUSED DEPOSITION MODELING, 2016.
5. A. Boschetto, L. Bottini, Accuracy prediction in fused deposition modeling, 2014.
6. ZOI MOZA\*, KONSTANTINOS KITSAKIS, JOHN KECHAGIAS, NIKOS MASTORAKIS, Optimizing Dimensional Accuracy of Fused Filament Fabrication using Taguchi Design, 2017.
7. MD EASIR ARAFAT PAPON, ANWARUL HAQUE and MUHAMMAD ALI ROB SHARIF, Effect of Nozzle Geometry on Melt Flow Simulation and Structural Property of Thermoplastic Nanocomposites in Fused Deposition Modeling, 2017
8. Alberto Boschetto, Luana Bottini, Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling, 2016
9. Gurpal Singh Bual, Parladdkumar, Methods to Improve Surface Finish of Parts Produced by Fused Deposition Modeling, 2014
- 10-D.T. Pham. s. s. Demov. Rapid Manufacturing: The technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling. Springer. Verlag London limited 2001.
- 11- C.C. Kai. L.K Fai. Rapid Prototyping. Principles and Applications in Manufacturing, World Scientific, 2000.

12-P Alexander, S Allen D. Dutta Part orientation and build cost determination in layered manufacturing Computer Aided Design 30 (5) (1998) 343-356

13-Brian Evans. Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing.

14-Chua, C.K., Leong, K.F. Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing, World Scientific (2000).

15- Thrimurthullu, K., Pandey, P.M., Reddy, N.V. (2004) Part Deposition Orientation in Fused Deposition Modeling .2004, 44, pp. 585-594. International Journal of Machine Tools and Manufacture.

16-Pham, D.T, Dimov, S.S. (2001) Rapid Manufacturing, Springer-Verlag London Limited.

17- K Thrimurthulu, Pulak M Pandey N Venkata Reddy. Optimum Part deposition orientation in fused deposition modeling international Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 585-594

18-Sarat Singamneni. Asimava Roychoudhury, Olaf Diegel Bin Huang. Modeling and evaluation of curved layer fused deposition. Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 27-35

19- Daekeon Ahn, Jin.Hwe Kweon. Soonnian Kwon, Jungil Song Seokhee lee. Representation of surface roughness in fused deposition modeling Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 5593.5600

20-Mostafa, M.A.G., M.S. Alsoufi, and B.A. Tayeb, *CAD/CAM Integration Based on Machining Features for Prismatic Parts*. International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science 2015. 4(3): p. 106-110.

21- Chua, C.K., K.F. Leong, and C.S. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 2010: World Scientific.

22- Wu, W.Z., et al., *Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing*. Materials Research Innovations, 2014. 18(sup5): p. S5-12-S5-16.

22- Ramli, F., et al., *Integrated recycle system concept for low cost 3Dprinter sustainability*. Proceedings of Mechanical Engineering Research Day 2015, 2015: p. 77-78.

23- AnHua, P. and X. XingMing, *Investigation on Reasons Inducing Error and Measures Improving Accuracy in Fused Deposition Modelling*. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012. 4(5): p. 149.

24- Mendonsa, C. and V.D. Shenoy, *Additive Manufacturing Technique in Pattern making for Metal Casting using Fused Filament Fabrication Printer*. Journal of Basic and Applied Engineering Research, 2014. 1(1): p. 10-13.

- 25- Türk, D.-A., et al., *Mechanical characterization of 3D printed polymers for fiber reinforced polymers processing*. Materials & Design, 2017. **118**: p. 256-265.
- 26- Yang, S.-l., et al., *Thermal and mechanical properties of chemical crosslinked polylactide (PLA)*. Polymer Testing, 2008. **27**(8): p. 957-963.
- 27- Rezayat, H., et al., *Structure–mechanical property relationship in fused deposition modelling*. Materials Science and Technology, 2015. **31**(8): p. 895-903.
- 28- Carneiro, O.S., A.F. Silva, and R. Gomes, *Fused deposition modeling with polypropylene*. Materials & Design, 2015. **83**: p. 768-776.
- 29- Nevin, H. and H. Mehrdad, *Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate*. Rapid Prototyping Journal, 2014. **20**(3): p. 221-227.
- 30- Letcher, T. and M. Waytashek, *Material Property Testing of 3DPrinted Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer*. 2014(46438): p. V02AT02A014.

## الملحق

### 1-برنامج قياس الخشونة باستخدام برنامج MATLAB

```
clear; clc; hold off;
```

```
filename = 'testdata.xlsx';
```

```
A = {'Angle', 'Ra', 'Rz'};
```

```
sheet = 2;
```

```
xlswrite(filename, A, sheet, 'E1');
```

```
warning('off', 'all');
```

```
specimen_name
```

```
= {'scale.jpg'; '0.jpg'; '10.jpg'; '20.jpg'; '30.jpg'; '40.jpg'; '50.jpg'; '60.jpg'; '70.jpg'; '80.jpg'; '90.jpg'};
```

```
xlRange = {'E1'; 'E3'; 'E5'; 'E7'; 'E9'; 'E11'; 'E13'; 'E15'; 'E17'; 'E21'; 'E23'};
```

```
%Get Scale
```

```
Scale_image = imread(specimen_name{1});
```

```
subplot(1,1,1);
```

```
imshow(Scale_image);
```

```
title("Scale_image");
```

```
disp("please choose area of 5 mm");
```

```
scale_size = getrect;
```

```
Scale_image = imcrop(Scale_image, scale_size);
```

```
imshow(Scale_image);
```

```
scale = 5000/size(Scale_image, 2);
```

```
%scale1 = 5000/scale_size(3);
```

```

%disp("please choose all the area ");
%scale_size2 = getrect;
%scale2 = scale_size2(3)/size(Scale_image, 2);

%scale = scale1 * scale2;

%pause(5);

clear fig;
grid on ;
%I = imread('' + numtostring(i) + '.jpg');

for specimen_number = 2:11

I = imread(specimen_name{specimen_number});
subplot(2,2,1);
imshow(I);
title("Specimens " + specimen_name{specimen_number});
hold;

disp("please choose area")
rect = getrect;
I = imcrop(I,rect);

I = I(:, :, 1);
%I2 = I(:, :, 2);
%I3 = I(:, :, 3);
%I = (I1 + I2 + I3)./3;

```

```

subplot(2,2,1);
imshow(I);
title("Specimens " + specimen_name{specimen_number});
hold off;

```

```

subplot(2,2,2);
BW1 = edge(I,'sobel',0.12); %0.15 good
imshow(BW1);
title("Edge");
axis([0 size(BW1,2) 0 size(BW1,1)]);
axis equal;
hold;
%pause(5);

```

```

Size_i = size(BW1);

```

```

% Covnert Image Pixels to x,y vectors

```

```

n = 0; x = []; y = [];
for u = 1:Size_i(2) %column Number
    for v = 1:Size_i(1) % Row number
        if BW1(v,u) == 1
            n = n + 1;
            x(n) = u;
            y(n) = Size_i(1) - v + 1;
        else
            end
        end
    end
end

```

```

subplot(2,2,3);
plot(x,y,'b');

```

```

title("Profile of Roughness");
axis([0 size(BW1,2) 0 size(BW1,1)]);
grid on;
axis equal;
%pause(5);

hold off;

p = polyfit(x,y,1);
subplot(2,2,4);
plot(x,polyval(p,x));
title("Avarage Line");
axis([0 100 0 200]);
axis equal;
grid on;
hold on;
%pause(5);

t=atan(p(1));
Slope_of_Spicemen=abs(180* t/pi);
[xcentre,ycentre]=center_of_image(BW1);

x=x-xcentre;
y=y-ycentre;

R2 = [cos(-t) ,-sin(-t) ; sin(-t), cos(-t)];
R3= R2* [x;y];
x=R3(1,:);
y=R3(2,:);

x = x + xcentre;
y = y + ycentre;

[sortedX,sortIndex] = sort(x);
y = y(sortIndex);

```

```
x = sortedX;
```

```
p = polyfit(x,y,1);  
plot(x,polyval(p,x),'g');  
axis([0 size(BW1,2) 0 size(BW1,1)]);  
grid on;  
axis equal;  
hold ;  
%pause(5);
```

```
subplot(2,2,3);  
plot(x,y,'g');  
title("Final Profile of Roughness");  
axis([0 size(BW1,2) 0 size(BW1,1)]);  
grid on;  
axis equal;
```

```
A = area(x,y);  
Yava = (A/(x(size(x,2)) - x(1)));
```

```
A3 = R_Area(x,y,Yava);  
Ra = A3/(x(size(x,2)) - x(1)); Ra = Ra * scale;  
disp("Ra = "), disp(Ra), disp("micro meter ");
```

```
ys = sort(y,'descend');  
ys = [ys,ys];  
ys = sort(ys,'descend');  
size(ys,2);
```

```

Rz1 = ( sum(ys(1:(size(ys,2)/2))) - sum(ys(((size(ys,2)/2) + 1):(size(ys,2)))) )/(0.5
        * (size(ys,2))); Rz1 = Rz1 * scale;
Rz2 = ( sum(ys(1:5))) - sum(ys(((size(ys,2) - 4):(size(ys,2)))) )/5; Rz2 = Rz2 * scale;
disp("Rz = "), disp(Rz1); disp("micro meter ");

```

```

[ypeak, locspeaks] = findpeaks(y,x);
[yvalley, locsvalley] = findpeaks(-y,x); yvalley = -yvalley;
ypeak = sort(ypeak, 'descend');
yvalley = sort(yvalley);

```

```

Rz3 = ( sum(ypeak(1:5)) - sum(yvalley(1:5)) ) /5 ; Rz3 = Rz3 * scale;
disp("Rz3 = "), disp(Rz3); disp("micro meter ");

```

```

filename = 'testdata.xlsx';
A = {(specimen_number - 2) * 10, Ra, Rz3};
sheet = 2;

```

```

%xlRange = 'E1';
xlswrite(filename, A, sheet, xlRange{specimen_number});

```

```

end

```



