

# تطوير معيار ضمان جودة لمنتجات الطباعة الليزرية ثلاثية الأبعاد

إعداد

م. علي عبد الله<sup>1</sup> د. ماجد حيبا<sup>2</sup> د. رفيع جبرة<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ماجستير في علوم المواد، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

<sup>2</sup> باحث رئيسي، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا،

mhaajiebda@gmail.com

<sup>3</sup> أستاذ، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

## ملخص البحث

التليد الانتقائي بالليزر عبارة عن تقانة طباعة ثلاثية الأبعاد قائمة على تليد شعاع ليزر لطبقات متتالية من مساحيق بلاستيكية خاصة بحيث تتحول إلى منتجات جاهزة دون الحاجة لمعالجات ميكانيكية لاحقة. تتمثل المشكلة المرتبطة بالاستثمار المجدي لتلك التقانة بحاجة المستثمرين لطيف واسع من المعارف والخبرات، وهو مالا يتوفر في معظم بيئات العمل العائدة لبلدان العالم الثالث. وضمن ذلك السياق، طرح البحث الحالي بهدف تجميع المعارف النظرية وتوليد الخبرات العملية اللازمة للوصول إلى وضع يسمح بالاستثمار المُجدي لطباعة تليد انتقائي نوع Sinterit Lisa، آخذين بالحسبان معالجة نتائج البحث بحيث تُقدّم على شكل معيار ضمان جودة.

**الكلمات المفتاحية:** الطباعة ثلاثية الأبعاد، التليد الانتقائي بالليزر، النايلون 12، اختبار مسح كمية الحرارة التفاضلي، معيار ضمان جودة.

# Development of a Quality Assurance Criteria for 3D Laser Printed Products

## Abstract

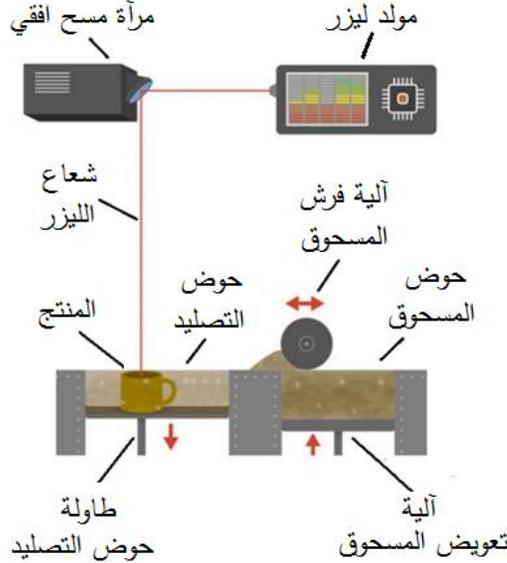
Selective Laser Sintering (SLS) is a 3D printing technique, which transforms specific kind of plastic powder into ready to use parts, without the need for an additional mechanical processing. Unfortunately, the efficient implementation of the technique requires considerable understanding and significant knowledge of the printing process, which are fully unavailable in the relevant industrial environment of the third world countries. Within this context, the present research was proposed with the aim of gathering the knowledge and gaining the experience required to professionally operate selective laser sintering printer of Sinterit Lisa type, taking into account the need for presenting the results as a quality control criteria.

**Keywords:** 3D printing, Selective laser sintering, Nylon 12, Differential scanning calorimetry test, Quality assurance criteria.

## 1. المقدمة.

حققت تقانة الطباعة ثلاثية الأبعاد انتشاراً واسعاً في الدول المتقدمة منذ نشأتها عام 1984، ويسود الاعتقاد بأنها ستنتشر بدرجة أكبر على مستوى العالم كاملاً خلال السنوات القليلة القادمة [1]. ولنشر استخدام هذه التقانة في دول العالم الثالث، تحتاج تلك الدول إلى أن يكون لديها العدد الكافي من الخبراء، ذلك لأن الوضع على أرض الواقع يؤكد النقص القائم في عدد الفنيين الذين يملكون الخبرات اللازمة لاستنباط وتوثيق المعارف اللازمة، ولوضع دراسات الجدوى، ولتوطين تقانات الطباعة المناسبة، وللتدريب على استثمارها بفعالية عالية، وللتوعية لأهمية البحث والاستثمار والتأهيل في ذلك المجال المهم [2]. وضمن هذا السياق، طرح البحث الحالي الذي يهدف إلى تطوير معيار ضمان جودة يسمح بالاستثمار المُجدي لطابعة ليزيرية ثلاثية الأبعاد نوع Sinterit Lisa، علماً بأن عمليات الاستثمار الأولى لتلك الطابعة لم تكن ناجحة.

## 2. التلييد الانتقائي بالليزر (SLS) Selective Laser Sintering



الشكل رقم (1): مبدأ عمل تقانة التلييد الانتقائي بالليزر [3].

يُبين الشكل رقم (1)، مبدأ التلييد الانتقائي بالليزر الذي يُعدّ تقانة طباعة ثلاثة الأبعاد قائمة على تلييد طبقات متتالية من مسحوق بوليميري مناسب بالاعتماد على نموذج رقمي. يتحقق ذلك وفقاً لتسلسل الخطوات التالية:

أ. ضبط المتغيرات<sup>1</sup> المتاحة في الطباعة المستعملة وذلك بمرجعية المادة الأولية المستعملة، والمواصفات المستهدفة للمنتج المطلوب طباعته.

ب. تعبئة حوض المسحوق بكمية كافية من المادة الأولية، ورفع درجة حرارة تلك المادة بشكل تدريجي حتى الوصول إلى درجة حرارة الحجرة Tch، التي تقل بحوالي درجتين مؤنيتين عن درجة حرارة انصهار المسحوق المستخدم.

ت. تشغيل آلية فرش المسحوق، مما يؤدي إلى (1) تحريك طاولة حوض التوضّع والتلييد (حوض التصليد) إلى الأسفل بمسافة مساوية للقيمة التي سبق ضبطها لمتغير سماكة الطبقة، (2) تحريك آلية تعويض المسحوق إلى الأعلى بمسافة مساوية للقيمة التي سبق ضبطها لمتغير سماكة الطبقة، (3) تفعيل آلية فرش المسحوق ما يتسبب بتوضّع طبقة مسحوق منتظمة السماكة فوق طاولة حوض التوضّع والتلييد، (4) تشغيل الليزر وتحريك شعاعه (بمرجعية إحداثيات مأخوذة من النموذج الرقمي (CAD model) للمنتج الجاري طباعته) بحيث يمسح ويُلبد جزءاً من طبقة المسحوق، أخذين بعين الاعتبار أن شكل ذلك الجزء يطابق شكل الشريحة الموافقة في النموذج الرقمي.

ث. وإتمام عملية الطباعة، تُحرّك طاولة حوض التوضّع والتلييد نحو الأسفل بمسافة مساوية لسماكة الطبقة التي تم تلييدها، وبعد ذلك تفرش طبقة جديدة من المسحوق وتلبد بالليزر، ويتكرر ذلك حتى إكمال عملية الطباعة. وإخراج

<sup>1</sup> المتغيرات المتاحة لضبطها في الطابعات المختلفة ليست واحدة، والطابعات الأكثر احترافية تتيح إمكانية ضبط استطاعة الليزر، ومساحة بقعة الليزر، وسرعة تحريك البقعة أو ما يعرف بسرعة المسح، وتباعد المسح، واتجاه توضع المنتج بالنسبة لطاولة البناء، وسماكة الطبقة، ونمط المسح، ودرجة حرارة حجرة البناء.

المنتج، لا بد من التريث حتى وصول درجة الحرارة داخل الطابعة إلى قيمة قريبة من درجة حرارة الجو الخارجي.

تجدر الإشارة إلى أن طابعات التليبيد الانتقائي بالليزر تكاد تقترب من كونها بنى إنتاج معتمدة. ومع ذلك، فإنها تعاني من المشاكل التالية التي تحد من تعميم استخدامها على نطاق صناعي واسع:

أ. محدودية البوليميرات الممكن تليبيدها بنجاح، فوفقاً ل [4, 5]، تنحصر الخيارات المتاحة بمسحوقي Nylon 11 و Nylon 12، حيث يصل معدل استهلاك الأخير لما يزيد عن 90 % من معدل الاستهلاك الكلي للمساحيق البوليميرية المستعملة في طابعات ال SLS.

ب. غلاء أسعار المساحيق المتوفرة في الأسواق العالمية، وظهور الحاجة لمعالجة مسألة مُخلفات الطباعة، ذلك أن نسب تلك المخلفات عالية بالمقارنة مع النسب المكتملة التي تدخل في تركيب المنتجات المطبوعة [5,6,7].

### 3. إشكالية التليبيد الانتقائي بالليزر.

وفقاً لما ذكر سابقاً، تكون المواد البوليميرية المستخدمة في طابعات ال SLS على شكل مساحيق يتم تليبيدها بهدف دمجها وتحويلها إلى منتجات. ويتحقق ذلك من خلال تعريض طبقات متتالية منها للتليبيد باستعمال حزمة ليزر بهدف الوصول إلى منتج نهائي من حيث الشكل والأبعاد وتحقيق المتطلبات الوظيفية. وضمن السياق أعلاه، لا بد من الإشارة إلى أن تحقيق منتجات طابعات ال SLS للمواصفات المطلوبة، يرتبط إلى حد كبير بالشروط التي تطبق خلال دورات عمل الطابعة. ويتطلب الحصول على منتجات طباعة نوعية ضبط متغيرات الطابعة المستخدمة على القيم المثلى، وبما يتوافق مع إمكانيات الضبط المتاحة، ومع نوع وطبيعة وبنية المسحوق المستخدم<sup>2</sup>. ويُمثل ذلك مسألة إشكالية نظراً لمحدودية القيم المثلى المتاحة في المراجع المختصة من جهة، ونظراً

<sup>2</sup> مسحوق جديد أو مستخدم بعملية طباعة سابقة لمرة واحدة أو أكثر أو معاد تدويره من خلال الخلط بنسبة ما من المسحوق الجديد.

لانعدام إمكانية تعميم استخدام القيم المتاحة دون قيود من جهة أخرى. ذلك لأن القيم المثلى الخاصة بمتغيرات طباعة ما، قد لا تكون مثلى في طباعة أخرى، ولأن القيم المثلى الخاصة بمسحوق ما، يمكن ألا تكون مثلى لمسحوق آخر مطابق للأول بالنوع ومختلف عنه في بعض المواصفات غير الأساسية مثل توزيع أبعاد الحبيبات، أو وسطي أبعادها.

#### 4. الدراسات المرجعية.

ضمن سياق العمل على تحديد النتائج المترتبة على جودة المنتجات الملبدة بالليزر كنتيجة لتغير طبيعة وسلوك مسحوق الـ Nylon 12 المستعمل، عمل الباحث M. Schmid وزملاؤه على مسحوقي Nylon 12 متطابقين في التركيب الكيميائي ومختلفين من حيث التوزيع الحجمي والبنية البلورية للحبيبات [6]. أكدت النتائج التي تم الحصول عليها أن متغيرات عملية الطباعة اللازم ضبطها للحصول على منتجات عالية الدقة مختلفة تماماً بين المسحوقين، وفُسر ذلك بالاعتماد على نتائج الاختبارات الحرارية التي أكدت التفاوت الكبير في السلوك الحراري للمسحوقين. وضمن سياق العمل على تحديد المعالجات المسبقة اللازمة لتحقيق نتائج إيجابية للمنتجات المصنعة من مسحوق Nylon 12 معاد تدويره، عمل الباحث W.A.Y Yusoff وزملاؤه على دراسة تجريبية حول تأثيرات استخدام المسحوق المعاد تدويره على جودة سطوح منتجات طريقة الـ SLS. وقد وجدوا أن استخدام المساحيق المعاد تدويرها يعطي منتجات ذات سطوح سيئة [8]. ولمعالجة هذه المشكلة، تم العمل على تطوير استراتيجية عمل قائمة على التحكم بأهم المتغيرات المرتبطة بعملية الـ SLS بما يضمن جودة سطوح المنتجات والاستخدام الفعال للمساحيق المعاد تدويرها. اشتملت المتغيرات التي أخذت بالاعتبار خلال الدراسة على تركيبة مسحوق الطباعة المستخدم من حيث نسب إضافة المسحوق الجديد إلى المسحوق المعاد تدويره. تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن خلائط المساحيق التي يقل معدل تدفق مصهورها (MFR) عن (18 g/10min) تؤدي إلى منتجات ذات سطوح رديئة. أما الباحث K. Dotchev وزملاؤه، فقد عملوا

على تحديد معدلات تدفق مصهور مسحوق الـ Nylon 12 قبل وبعد تعرضه لمعالجات ضمن فرن تتشابه بيئته مع بيئة العمل في طباعة SLS [9]. أكد ما تم استخلاصه بنتيجة هذه الدراسة على أن التدهور في مواصفات وسلوك المساحيق يتناسب بشكل طردي مع درجة حرارة المعالجة ومع زمنها، وعلى أن معدل تدفق المصهور يعبر بحساسية عالية عن تغير خصائص المسحوق الخاضع للمعالجة، وبالتالي يوفر طريقة سريعة وغير مكلفة نسبياً لقياس معدل تقادم المسحوق بسبب تعرضه لمعالجة SLS. وضمن سياق البحث المنفذ من قبل الباحث S. Dadbakhsha وزملاؤه، تم اختبار مساحيق Nylon 12 متعددة، الأول منها جديد، والثاني خاضع لدورة SLS واحدة، والثالث مكون من مزيج من المسحوقين السابقين. تناول العمل توضيح تأثير التقادم الناتج عن التعرض لدورات الـ SLS على السلوك الحراري للإلتحام وعلى الخواص الميكانيكية لعينات وحيدة الطبقة [10]. تُبين النتيجة الأولى التي تم التوصل لها أن حبيبات المسحوق الجديد تلتحم بسرعة أثناء التسخين. وعلى العكس من ذلك، تبدأ حبيبات المسحوق المعاد تدويرها بالإلتحام عند درجات حرارة أعلى، حيث يستمر ذلك حتى حصول الانصهار الكامل. أما سلوك حبيبات المسحوق المختلط، فيقع بين سلوكي المسحوق الجديد والمُعاد استخدامه. إما النتيجة الثانية، فتؤكد على إظهار منتجات المسحوق الجديد قدرة أكبر على تحمل قوى الشد، أما المنتجات المكافئة المصنعة من مساحيق مدورة، فأبدت قدرة أقل على تحمل تلك القوى. وفيما يتعلق بالنتيجة الأخيرة، فتؤكد على امتلاك عينات المساحيق المحضرة من خلال مزج 50 % مسحوق جديد ومثلها مسحوق معاد التدوير ذو مقاومة شد عالية وسلوك انهيار لدن.

يؤكد ما يمكن استخلاصه من مراجعة الأدبيات أعلاه على استمرار أعمال البحث العلمي الساعية للتعرف على العلاقات القائمة بين مواصفات مسحوق الـ Nylon 12 وسلوكه عندما يتعرض للمعالجات الحرارية نتيجة إخضاعه لدورات SLS وبين منتجات الطباعة من حيث مطابقة الأبعاد والصلاحية الإنشائية، ومن حيث جودة السطوح، وأخيراً من حيث القدرة على مقاومة الأحمال المطبقة. كما أنها تؤكد أيضاً على إشكالية موضوع

إعادة تدوير مساحيق الـ Nylon 12 المستخدمة في طابعات الـ SLS، وبأن الحل الموصى به من قبل إحدى الشركات المصنّعة لتلك المساحيق (مجرد المزج بنسبة 30 % من المسحوق الجديد) قد يكون غير كافٍ، ولا بد من اعتماد معايير ضمان جودة مناسبة (مثل معيار Melt Flow Rate-MFR و- Particle Size Distribution PSD) تؤكد بجاهزية المساحيق الخاضعة لإعادة التدوير للدخول في دورات طباعة جديدة قبل المباشرة بذلك، ما يضمن مطابقة المنتجات المطبوعة وتخفيض الهدر إلى الحدود الدنيا الممكنة.

## 5. المواد الأولية.

يتطلب العمل على تحقيق أهداف البحث الحالي التعامل بشكل تجريبي مع تراكيب متعددة من مساحيق الـ Nylon 12 المتوفرة أو التي يمكن تأمينها من خلال مزج نسب متعددة من المواد المتاحة، على النحو التالي:

- مسحوق جديد من إنتاج الشركة البولندية Sinterit sp.، يتمتع بالموصفات المدرجة في الجدول رقم (1).
- مسحوق خاضع لدورة طباعة واحدة، وآخر خاضع لدورتي طباعة.
- مساحيق متعددة معدة من خلال مزج 20 % و 30 % و 40 % و 60 % من المسحوق الجديد مع نسب مكتملة من مسحوق خاضع لدورة طباعة واحدة.

الجدول رقم (1): المواصفات الاسمية للمسحوق الجديد [11].

العائديه	المواصفة	القيمة	
المادة الأولية	أبعاد حبيبات المسحوق	من 18 وحتى 90 $\mu\text{m}$	
	متوسط أبعاد حبيبات المسحوق	38 $\mu\text{m}$	
	نسبة إعادة التدوير <sup>3</sup>	30%	
المواصفات الميكانيكية والحرارية	الاستطالة عند الانهيار	13%	
	مقاومة الشد	41 MPa	
	الخشونة عند الطباعة بشرائح سماكة 100 $\mu\text{m}$	السطوح العلوية	6,470 $\mu\text{m}$
		السطوح السفلية الجانبية	9.680 $\mu\text{m}$
	درجة حرارة الانصهار	182 °C	
	كثافة المنتجات المطبوعة بالمسحوق المسحوق	1.00 [g/cm <sup>3</sup> ]	

## 6. الطباعة المستعملة.

تم ضمن سياق هذا العمل استعمال طباعة من النوع العامل بتقانة الـ SLS، نموذج Lisa، من إنتاج شركة Sinterit sp, z o,o, d. يعطي الجدول رقم (2) مواصفاتها الاسمية.

<sup>3</sup> النسبة المئوية للمسحوق الجديد الذي يجب مزجه مع المسحوق المستعمل بهدف إعادة تدوير الأخير بنجاح.

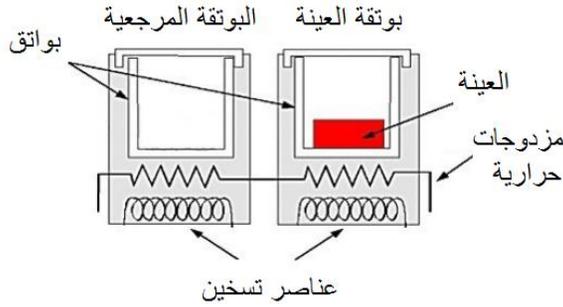
الجدول رقم (2): المواصفات الاسمية للطابعة [12].

المواصفة	القيمة
أبعاد حبيبات مسحوق الـ Nylon 12	20 to 100 $\mu\text{m}$ , average size
حجم البناء الأقصى	150 x 200 x 150 mm
الحد الأقصى لحجم الطباعة عالية الدقة للـ	90 x 110 x 130 mm
الدقة الاسمية في المستوي XY	0,1 mm
السماكة الدنيا لطبقة المسحوق	0,075 mm
السماكة الدنيا للجدار	0.4 mm
درجة الحرارة القصوى في غرفة البناء	190 $^{\circ}\text{C}$
برمجية ضبط المتغيرات والتحكم بالطابعة	Sinterit Studio 2016
البنى الداعمة	غير مطلوبة

7. تجهيزات التوصيف الحراري والميكانيكي لمجموعات مساحيق الطباعة.

1.7 التوصيف الحراري- جهاز التحليل الحراري الانتالبي التفاضلي الماسح (DSC).

يبين الشكل رقم (2) رسم تمثيلي للتجهيزات الخاصة باختبار الـ DSC.



الشكل رقم (2): رسم تمثيلي للتجهيزات الخاصة باختبار الـ DSC [13].

يقوم مبدأ عمل أجهزة الـ DSC على قياس كميات الحرارة المتبادلة مع العينات كتابع لدرجات الحرارة والزمن في أجواء مضبوطة، حيث يتحقق ذلك من خلال قياس

اختلافات التدفق الحراري بين بوتقة العينات المراد اختبارها وبوتقة مرجعية فارغة. ولتنفيذ اختبارات الـ DSC اللازمة للبحث الحالي، جرى استعمال جهاز طرازه Setaram LABSYS evo DTA/DSC، من إنتاج الشركة الفرنسية Instrumentation، يتمتع بالمواصفات الأساسية المدرجة في الجدول رقم (3).

الجدول رقم (3): مواصفات جهاز الـ DSC [13].

المواصفة	القيمة
المجال الحراري	من درجة حرارة الغرفة وحتى $1150^{\circ}\text{C}$
دقة تثبيت درجة الحرارة	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
معدل تغير درجة الحرارة أثناء التسخين	قابلة للضبط ضمن المجال 0.01 to 100
زمن تبريد الفرن من $1150^{\circ}\text{C}$ وحتى $^{\circ}\text{C}$	30 دقيقة
الكتلة القصوى الممكن إيصالها لوضع	20 غرام
الخلأ	$< 10^{-1}\text{ MPa}$
نوع وسيط التسخين	هواء

ولضمان دقة النتائج لا بد من المباشرة بمعايرة الجهاز، حيث يتحقق ذلك من خلال اختبار عينة معيارية مصنعة من مادة الأنديموم، وبنتيجة ذلك يُعاير الجهاز نفسه بدون أي مداخل من المستثمر. وحال الانتهاء من ذلك، يصبح الجهاز جاهزاً للاستثمار. ضبطت متغيرات الجهاز على القيم التالية:

- تدفق الهواء: 2 L/min.
- معدل التسخين:  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، ومعدل التبريد:  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .
- درجة الحرارة البدائية:  $22^{\circ}\text{C}$ .
- درجة الحرارة النهائية:  $220^{\circ}\text{C}$ .
- كتلة العينة المستعملة: 0.015 g.

## 2.7 التوصيف الميكانيكي - جهاز اختبار الشد الستاتيكي.

جرى استخدام جهاز اختبارات ميكانيكية عام طراز WDW-50، من إنتاج الشركة الصينية Jinan Kason Testing Equipment [14]. حُصرت المساحيق ومزائجها اللازمة لذلك، وضُبطت متغيرات الطباعة ذات العلاقة، ومن ثم نفذت الاختبارات مع أخذ النقاط التالية بعين الاعتبار:

- تخيل المساحيق المعاد تدويرها بهدف استبعاد الحبيبات التي تزيد أبعادها عن  $90 \mu\text{m}$ .
- إخضاع مزائج المساحيق المطلوب تجهيزها لعمليات مزج آلي لمدة 15 دقيقة لكل منها.
- تخزين المساحيق والمزائج المُعدّة للطباعة في أوعية كتيمة لحين تنفيذ أعمال الطباعة.
- ضبط درجات حرارة حجرة الطباعة  $T_{ch}$  على قيمة الـ  $T_{mpeak}$  الموافقة للمسحوق أو لمزيج المسحوق الجاري طباعته، وذلك بمرجعية المعطيات المدرجة في الجدول رقم (4).
- ضبط باقي متغيرات الطباعة على القيم الموصى بها من قبل الشركة المصنعة للطباعة، والحفاظ على ذلك دون تغيير خلال مراحل الطباعة المتتالية لكافة العينات.
- قياس أبعاد المقاطع العرضية الخاصة بكافة العينات المنتجة بالطباعة وذلك باستعمال أداة قياس دقتها  $0.01 \text{ mm}$ ، وبعد ذلك حساب المتوسطات السماكة  $h_{mean}$  و العرض  $b_{1 mean}$  لكل مجموعة عينات.
- تنفيذ اختبارات الشد ومعالجة نتائجها بهدف الحصول على قيم مقاومة الشد  $\sigma_{umean}$ .

## 8. الآلية المعتمدة لتطوير معيار ضمان جودة منتجات طباعة ثلاثية الأبعاد بواسطة التليد الانتقائي بالليزر.

يعطي الشكل رقم (3)، المخطط الانسيابي لآلية معيار ضمان جودة منتجات طباعة ثلاثية الأبعاد بواسطة التليد الانتقائي بالليزر. ويهدف معيار ضمان الجودة هذا إلى الإقرار بمدى ملاءمة تركيبة ما من مسحوق الطباعة للاستخدام الناجح في طابعات الـ SLS. وفي حال تحقق ذلك، الإقرار بدرجة حرارة حجرة الطباعة الموافقة لذلك. أما خطة العمل التي اعتمدت لتطوير ذلك المعيار، فاشتملت على الخطوات التالية:

I. تنفيذ اختبارات الـ DSC اللازمة للتعرف على السلوك الحراري لمسحوق الـ Nylon 12 الجديد والخاضع لدورة طباعة واحدة ولدورتي طباعة، وللمسحوق الخاضع لدورة طباعة واحدة والممزوج بنسب 20% و 30% و 40% و 60% من المسحوق الجديد. أعطيت عينات المسحوق المستعملة في هذه الاختبارات التسميات "مجموعة العينات 1"، "مجموعة العينات 2"، "مجموعة العينات 3"، "مجموعة العينات 4"، و "مجموعة العينات 5"، و "مجموعة العينات 6"، و "مجموعة العينات 7" على الترتيب. تسمح اختبارات الـ DSC بتعيين درجات حرارة بداية الانصهار  $Tm_{onset}$  وقمة الانصهار  $Tm_{peak}$  ونهاية الانصهار  $Tm_{end}$  لكل مجموعة مسحوق طباعة.

II. إعداد التصميم الحاسوبي الخاص بعينة الشد المعتمدة، والمطابقة من حيث

III. ها وأبعادها لما هو مدرج في الشكل رقم (4) [15].

IV. تجهيز الطابعة بكمية كافية من المسحوق الجديد وضبط درجة حرارة حجرة البناء على قيمة الـ  $Tm_{peak}$  التي تم الحصول عليها من تنفيذ اختبارات الـ DSC على مجموعة العينات 1، وبعد ذلك تنفيذ الطباعة لثلاث عينات شد<sup>4</sup>.

V. إعادة الخطوة السابقة على مجموعات العينات من 2 وحتى 7، وبالنتيجة تم الحصول على 7 مجموعات من عينات الشد، وللتمييز بينها أعطيت التسميات

<sup>4</sup> تم حفظ العينات الناتجة عن كل عملية طباعة في كيس بلاستيكي محكم الأغلاق ومجهز ببطاقة تعريف لتمييزه عن غيره.

"مجموعة العينات 8"، و "مجموعة العينات 9"، و "مجموعة العينات 10"، و "مجموعة العينات 11"، و "مجموعة العينات 12"، و "مجموعة العينات 13"، و "مجموعة العينات 14" بالتتابع.

**VI.** قياس السماكة  $h$  والعرض  $b_1$  لكافة عينات الشد المنتجة، وإيجاد المتوسطات الحسابية الخاصة بهما لكل مجموعة عينات على حده.

**VII.** إخضاع كافة العينات المنتجة لاختبار شد تقليدي، ومعالجة النتائج بهدف الحصول على المتوسطات الحسابية لمقاومة الشد  $\sigma_{u \text{ mean}}$  الخاصة بكل مجموعة عينات على حده.

**VIII.** تصنيف عمليات الطباعة إلى عمليات ناجحة وعمليات فاشلة، حيث تعتبر الطباعة الخاصة بمجموعة عينات ما ناجحة إذا حققت المعايير التالية، وفاشلة في الحالات الأخرى:

أ. المتوسط الحسابي للسماكة  $h$  محقق للقيمة  $0.2 \pm 3$ ، حيث تعود القيمة 3 إلى الشكل رقم (4)، واعتمد التسامح  $\pm 0.2$  باعتباره يتوافق مع الدقة الاسمية للطباعة المستعملة، وفقاً لمعطيات الجدول رقم (2).

ب. المتوسط الحسابي للعرض  $b_1$  محقق للقيمة  $0.2 \pm 6$ ، حيث تعود القيمة 6 إلى الشكل رقم (4)، واعتمد التسامح  $\pm 0.2$  باعتباره يتوافق مع الدقة الاسمية للطباعة المستعملة، وفقاً لمعطيات الجدول رقم (2).

ت. المتوسط الحسابي لمقاومة الشد يساوي أو يزيد عن القيمة  $41 \text{ MPa}$ ، وهي القيمة الاسمية الممكن تحقيقها وفقاً لما تؤكد المعطيات المدرجة في الجدول رقم (2).

**IX.** تصنيف عينات الشد الفاشلة ضمن مجموعتين: الأولى ناقصة التلييد (حدود مقاومتها للشد أقل من  $41 \text{ MPa}$ ) بسبب انخفاض درجة حجرة البناء عن الدرجة اللازمة لتحقيق تلييد كامل لتרכيبة المسحوق المستخدم؛ والثانية مشوهة الشكل وأبعادها أكبر من المطلوب بسبب خروج المسحوق عن الاستقرار وحدوث التصاق

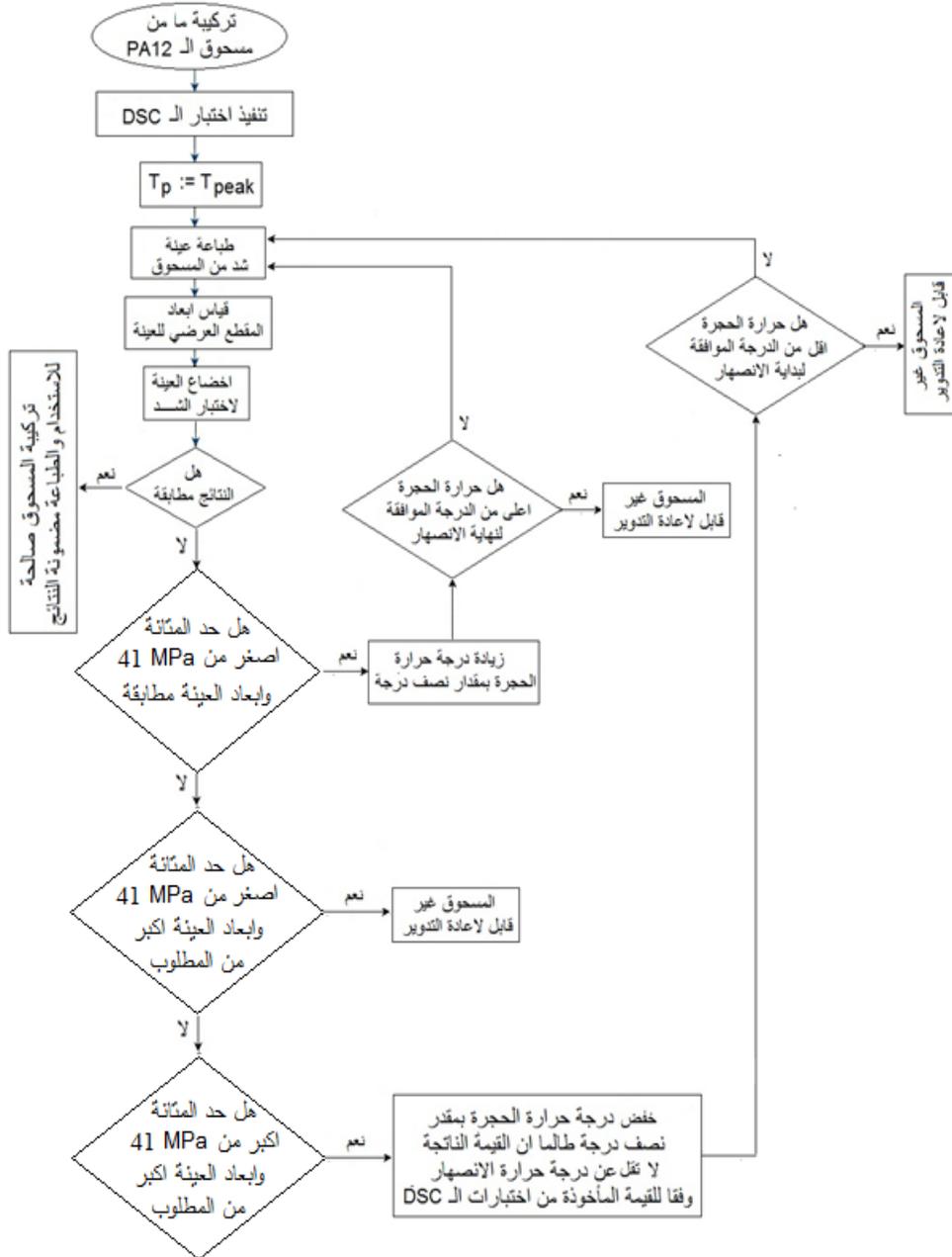
بين حبيباته الخاضعة للتليبد الانتقائي بالليزر والحبيبات المجاورة لها غير الخاضعة لذلك.

X. إعادة طباعة عينات المجموعة الأولى (العينات ناقصة التليبد) بالتتالي، أخذين بعين الاعتبار تنفيذ ذلك بعد إعادة ضبط درجات حرارة حجرة الطباعة على قيم أعلى بـ  $0.5^{\circ}\text{C}$ <sup>5</sup> من القيم المعتمدة عند طباعتها السابقة، وبعد التأكد من أن درجات الحرارة الجديدة لا تزيد عن درجات حرارة نهاية الانصهار  $T_{m\text{end}}$  الموافقة، وتكرار ذلك حتى الحصول على عينات ناجحة أو وصول درجات الحرارة المحسوبة للحجرة إلى قيم أعلى من القيم الموافقة الخاصة بنهاية الانصهار.

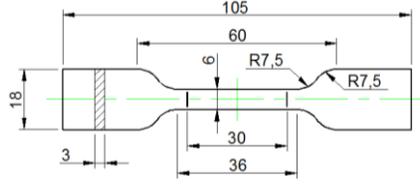
XI. إعادة طباعة عينات المجموعة الثانية (العينات المشوهة) بالتتالي، أخذين بعين الاعتبار تنفيذ ذلك بعد إعادة ضبط درجات حرارة حجرة الطباعة على قيم أقل بـ  $0.5^{\circ}\text{C}$ <sup>5</sup> من القيم المعتمدة عند إنتاج العينات الفاشلة، وبعد التأكد من أن القيم الناتجة لا تقل عن درجات حرارة بداية الانصهار  $T_{m\text{onset}}$  الموافقة، وتكرار ذلك حتى الحصول على عينات ناجحة أو وصول درجات الحرارة المحسوبة للحجرة إلى قيم أقل من القيم الموافقة الخاصة ببداية الانصهار.

XII. اعتماد معيار ضمان جودة قائم على التعامل مع درجات حرارة الحجرة التي أنتجت عينات ناجحة باعتبارها مرجعية (يمكن اعتمادها بشكل متكرر كلما كانت الحاجة قائمة لإعادة تدوير المسحوق الموافق لها)، واعتبار خلائط المساحيق المطابقة في تركيبها لتلك التي أنتجت عينات فاشلة غير قابلة لإعادة التدوير والحاجة قائمة للتخلص منها دون الإضرار بالبيئة.

<sup>5</sup> وفقاً لما توصي به الشركة المصنعة للمسحوق وللطباعة.



الشكل رقم (3): المخطط الانسيابي لآلية معيار ضمان جودة منتجات طباعة ثلاثية الأبعاد بواسطة التليبد الانتقائي بالليزر.

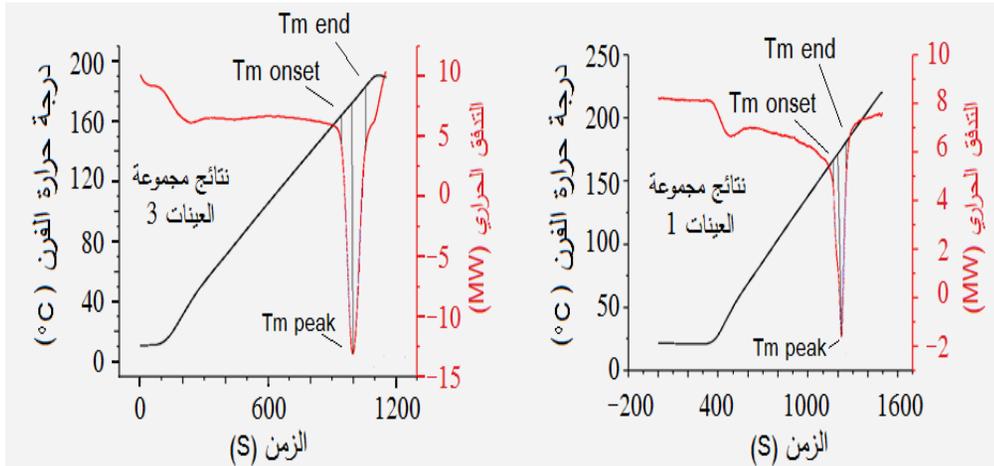


الشكل رقم (4): التصميم المعتمد لعينات الشد [15].

## 9. نتائج التوصيف الحراري والميكانيكي لمجموعات مساحيق الطباعة.

### 1.9 نتائج التوصيف الحراري.

يعطي الشكل رقم (5) نموذجين من منحنيات الـ DSC المستهدفة. وبمعالجة معطيات تلك المنحنيات، تم استنتاج قيم درجات حرارة انصهار كل من مجموعات مساحيق الطباعة، أي  $Tm_{peak}$  و  $Tm_{onset}$  و  $Tm_{end}$  الواردة في الجدول رقم (4).



الشكل رقم (5): نماذج من نتائج اختبارات الـ DSC.

الجدول رقم (4): قيم درجات الحرارة الموافقة لانصهار عينات مجموعات مساحيق الطباعة.

رقم مجموعة	$T_{m_{onset}}$ (°C)	$T_{m_{peak}}$ (°C)	$T_{m_{end}}$ (°C)	$T_{m_{end}} - T_{m_{onset}}$
1	174.0	176.2	178.0	4.0
2	172.5	173.5	174.0	1.5
3	172.0	172.4	173.4	1.4
4	172.0	172.5	173.0	1.0
5	172.0	172.7	173.5	1.5
6	173.0	173.5	175.0	2.0
7	173.0	174.5	175.0	2.0

## 2.9 نتائج التوصيف والميكانيكي.

يعطي الجدول رقم (5) نتائج قياس الأبعاد والتوصيف الميكانيكي لعينات الشد لمجموعات مساحيق الطباعة.

الجدول رقم (5): متوسطات أبعاد المقاطع الفعالة ومتوسطات مقاومة الشد لعينات الشد لمجموعات مساحيق الطباعة.

رقم مجموعة العينات	$T_{ch}$ (°C) <sup>6</sup>	$h_{mean}$ (mm)	$b_{1mean}$ (mm)	$\sigma_{umean}$ (MPa)
8	176.0	3.08	6.07	51.50
9	173.5	3.34	6.48	29.99
10	172.5	3.36	6.53	28.72
11	172.5	3.03	5.82	35.06
12	173.0	3.10	6.00	29.70
13	173.5	3.00	5.98	28.15
14	174.5	2.83	5.81	21.00

<sup>6</sup> مساوية لـ  $T_{m_{peak}}$  للعينة المعنية.

## 10. مناقشة نتائج التوصيف الحراري والميكانيكي لمجموعات مساحيق الطباعة.

1.10 مناقشة نتائج اختبارات التوصيف الحراري الـ DSC: بمقارنة قيم درجات الحرارة الموافقة لانصهار مجموعات عينات مساحيق الطباعة من 1 وحتى 7 في الجدول رقم (4) مع بعضها البعض ومع تلك العائدة للمسحوق الجديد، يُستنتج ما يلي:

1. يبلغ عرض قمة انصهار المسحوق الجديد مقدار  $T_{m\text{end}} - T_{m\text{onset}} = 4^\circ\text{C}$ ، وهو العرض الأكبر بين القيم المكافئة العائدة لباقي مجموعات مساحيق الطباعة.

2. تبلغ درجة حرارة قمة انصهار المسحوق الجديد  $T_m \text{ peak} = 176.2^\circ\text{C}$ ، وهي الدرجة الأعلى بين القيم المكافئة العائدة لباقي مجموعات مساحيق الطباعة.

3. عرض قمة انصهار المسحوق الخاضع لدورة طباعة واحدة ودرجة حرارة قمة انصهاره أعلى من مكافئيهما في المسحوق الخاضع لدورتي طباعة، ما يشير إلى تغيير سلوك المسحوقين عند إخضاعهما لمعالجات الطباعة بتقانة الـ SLS.

4. يكون الفرق بين عرض قمة انصهار المسحوق الجديد وعرض قمة انصهار المسحوق الخاضع لدورة طباعة واحدة ( $2.5^\circ\text{C}$ ) أقل من الفرق المكافئ العائد للمسحوق الخاضع لدورتي طباعة ( $2.6^\circ\text{C}$ )، ما يشير إلى تراكم الآثار السلبية الناتجة عن إخضاع مساحيق الـ Nylon12 للمزيد من عمليات المعالجة الحرارية في طابعات الـ SLS.

5. يقل الفرق بين عرض قمة انصهار مزائج المسحوق المستخدم لمرة واحدة مع المسحوق الجديد وعرض قمة انصهار المسحوق الجديد كلما زادت نسبة المسحوق الجديد في المزيج، ما يشير إلى إمكانية تحسين المساحيق المستخدمة من خلال المزج مع نسب متزايدة من المسحوق الجديد.

- 2.10 مناقشة نتائج اختبارات الشد:** يشتمل الجدول رقم (5) على متوسطات مقاومة الشد ومتوسطات أبعاد المقاطع العرضية العائدة لمجموعات المساحيق من 9 وحتى 16. وبمقارنة تلك النتائج مع بعضها البعض من جهة، ومع القيم المكافئة العائدة للمسحوق الجديد من جهة ثانية، يستنتج ما يلي:
1. يكون وسطي مقاومة الشد للعينات المطبوعة باستخدام المسحوق الجديد هو الأعلى بين القيم المكافئة العائدة لعينات مساحيق المزائج بين المسحوق الجديد والمسحوق المستخدم لمرة واحدة.
  2. تقع الانحرافات في أبعاد المقاطع العرضية لعينات مساحيق المزائج بين المسحوق الجديد والمسحوق المستخدم لمرة واحدة ضمن مجال التسامحات الاسمية للطابعة المستخدمة.
  3. يكون وسطي مقاومة الشد للعينات المطبوعة باستخدام المسحوق الخاضع لدورة طباعة واحدة أكبر من مثيله العائد للعينات المطبوعة من مسحوق خاضع لدورتي طباعة، وكلاهما أقل من 41 MPa.
  4. لا تقع دقة وسطي أبعاد المقطع العرضي للعينات المطبوعة باستخدام المسحوق الخاضع لدورة طباعة واحدة والعينات المطبوعة من مسحوق خاضع لدورتي طباعة ضمن مجال التسامحات الاسمية للطابعة المستخدمة.
  5. تنخفض متوسطات مقاومة الشد كلما زادت نسبة المسحوق الجديد المستعمل في تحضير مزائج المساحيق المعاد تدويرها بعد دورة طباعة واحدة، وهذا ما قد يبدو غريباً إن لم نأخذ بالحسبان أن الطباعة تمت عند درجات حرارة افتراضية مساوية لـ  $T_{mpeak}$ ، ما يؤكد على أن الحاجة قائمة لإعادة الطباعة والاختبار بعد إعادة النظر في تلك الدرجات، نقصاناً أو زيادةً، وذلك بمرجعية المعايير التي حددت في الفقرة رقم (8) حول آلية تطوير معيار ضمان جودة منتجات طباعة ثلاثية الأبعاد.

**3.10 مناقشة نتائج تطبيق معيار ضمان الجودة:** اعتمد معيار ضمن الجودة المقترح على مقارنة أبعاد العينات المطبوعة ومقاومة شدها مع قيم اسمية محددة من قبل الشركة المصنعة للطباعة وللمسحوق، حيث يجري العمل بمرجعية ذلك المعيار بهدف تقييم قابلية مزائج المساحيق المتاحة (جديد ومستعمل في عملية طباعة واحدة و .. الخ) لتحقيق طباعة ناجحة، ومن ثم تحديد درجة حرارة الحجره الأمثلية اللازمة لذلك. وبتطبيق ذلك المعيار على مجموعات عينات المسحوق الجديد ومزائجه مع مسحوق مستخدم لمرة واحدة رقم 7 وحتى 14، تم التوصل إلى النتائج المدرجة في الجدول رقم (6). وبدراسة تلك النتائج بشكل تفصيلي، جرى استخلاص ما يلي:

1. تُعدّ عينات الشد المطبوعة باستخدام مسحوق جديد، عند درجة حرارة حجره مطابقة لدرجة حرارة قمة انصهاره المسجلة في اختبار DSC، مطابقة من حيث الأبعاد، وهي تحقق مقاومة شد أعلى بشكل ملحوظ من القيمة الاسمية المحددة من قبل الشركة المصنعة لذلك المسحوق.
2. تُعدّ عينات الشد المطبوعة باستخدام مسحوق مستعمل لمرة واحدة أو أكثر، عند درجة حرارة حجره مطابقة لدرجة حرارة قمة انصهاره المسجلة في اختبار DSC، غير مطابقة من حيث الأبعاد وهي تحقق مقاومة شد أقل بشكل ملحوظ من القيمة الاسمية. وبالتالي، فهذه الأنواع من المساحيق غير قابلة لإعادة التدوير والحاجة قائمة لتحسين مواصفاتها وسلوكها من خلال المزج مع نسب من المسحوق الجديد قبل محاولة الاستفاده منها.
3. تُعدّ عينات الشد المطبوعة باستخدام مزائج مساحيق من نسب محددة من المسحوق المستعمل لمرة واحدة ونسب متممة لـ 100% من المسحوق الجديد، عند درجة حرارة حجره مطابقة لدرجة حرارة قمة انصهارها المسجلة في اختبار DSC، مطابقة من حيث الأبعاد، وهي تحقق حدود مقاومة شد أقل بشكل ملحوظ من القيمة الاسمية. وبالتالي، فتقييم إمكانية استخدام هذا النوع من مزائج المساحيق في عمليات طباعة ناجحة يحتاج إلى رفع درجة حرارة حجره الطباعة بمقدار نصف درجة وإعادة الطباعة والتقييم من جديد.

الجدول رقم (6): نتائج تطبيق معيار ضمان الجودة المقترح على مجموعات مسحوق الطباعة الجديد ومزائجه مع مسحوق مستخدم لمرة واحدة.

رقم مجموعة العينات	نتيجة التقييم بمرجعية المعايير المعتمدة للمطابقة البعدية والإنشائية	القرار وما يجب عمله لمتابعة عملية التقييم
8	مطابقة بعدية وإنشائية، عند ضبط درجة حرارة الحجرة $T_{ch} = T_{m \text{ peak}} = 176 \text{ }^\circ\text{C}$	الحاجة غير قائمة لأي إجراء بسبب المطابقة
9	أبعاد أكبر من المطلوب ومقاومة شد أقل من المطلوب، عند ضبط درجة حرارة الحجرة بحيث $T_{ch} = T_{m \text{ peak}} = 173.5 \text{ }^\circ\text{C}$	غير قابل لإعادة التدوير بسبب عدم المطابقة البعدية والإنشائية
10	أبعاد أكبر من المطلوب ومقاومة شد أقل من المطلوب، عند ضبط درجة حرارة الحجرة بحيث $T_{ch} = T_{m \text{ peak}} = 172.4 \text{ }^\circ\text{C}$	غير قابل لإعادة التدوير بسبب عدم المطابقة البعدية والإنشائية
11	مطابقة بعدية ومقاومة شد أقل من المطلوب، عند ضبط درجة حرارة الحجرة بحيث $T_{ch} = T_{m \text{ peak}}$	زيادة درجة حرارة الحجرة بمقدار نصف درجة وإعادة الطباعة
12	مطابقة بعدية ومقاومة شد أقل من المطلوب، عند ضبط درجة حرارة الحجرة بحيث $T_{ch} = T_{m \text{ peak}}$	زيادة درجة حرارة الحجرة بمقدار نصف درجة وإعادة الطباعة
13	مطابقة بعدية ومقاومة شد أقل من المطلوب، عند ضبط درجة حرارة الحجرة بحيث $T_{ch} = T_{m \text{ peak}}$	زيادة درجة حرارة الحجرة بمقدار نصف درجة وإعادة الطباعة
14	مطابقة بعدية ومقاومة شد أقل من المطلوب، عند ضبط درجة حرارة الحجرة بحيث $T_{ch} = T_{m \text{ peak}}$	زيادة درجة حرارة الحجرة بمقدار نصف درجة وإعادة الطباعة

## 11. الاستنتاجات:

يمكن تلخيص نتائج هذا العمل في ما يلي:

- 1- يستدعي الاستثمار الاقتصادي لطابعات الـ SLS توفير المعارف والخبرات اللازمة لإعادة تدوير مخلفات المساحيق الناتجة عن عمليات طباعة سابقة، وتوفير وسائل التوصيف المناسبة.
- 2- تشكل مسألة إعادة تدوير المخلفات الناتجة عن استثمار طابعات الـ SLS تحدياً للهيئات البحثية العالمية والمحلية، وما زالت الأبحاث قائمة حتى تاريخه لمعالجة هذه المسألة، وهذا ما تؤكدته التواريخ الحديثة لبعض مراجع هذا البحث.
- 3- يعتمد معيار ضمان جودة المساحيق المستعملة في طابعات الـ SLS في الوقت الراهن على قياس سرعة تدفق المصهور (Melt Flow Index)، علماً بأن العديد من الأبحاث أشارت إلى انخفاض حساسية هذا المعيار وإلى عدم اقتصادية اختباراته، وبالتالي، فالحاجة قائمة لتطوير هذا المعيار و/أو تطوير معيار بديل.
- 4- يستلزم الحصول على منتجات طباعة مطابقة من حيث الأبعاد ومن حيث القدرة على مقاومة أحمال الشد ضبطاً دقيقاً لدرجة حرارة حجرة الطباعة.
- 5- تختلف درجة حرارة الحجرة الأمثلية باختلاف طبيعة المسحوق المستعمل (جديد، مستخدم لمرة واحدة، ... الخ)، وقيمتها للمسحوق الجديد أعلى بعدة درجات منها للمساحيق المستعملة.
- 6- مقاومة الشد للعينات المطبوعة باستخدام المسحوق الجديد أعلى من القيم المكافئة الخاصة بالعينات المطبوعة باستخدام مزائجه مع المساحيق المستعملة.
- 7- تتطلب معالجة العينات المطابقة من ناحية دقة الأبعاد وغير المطابقة من ناحية مقاومة أحمال الشد رفع درجة حرارة حجرة الطباعة بمقدار نصف درجة وإعادة الطباعة والتقييم بمرجعية المنهجية المطورة في البحث الحالي.
- 8- تعدّ المساحيق التي أنتجت عينات شد ذات أبعاد أكبر من القيم الاسمية ومقاومة شد أقل من 41 MPa غير قابلة لإعادة التدوير، ذلك لأن تخفيض

درجة حرارة حجرة الطباعة سيؤدي إلى انخفاض إضافي في قيم مقاومة الشد، ورفع درجة حرارة حجرة الطباعة سيؤدي إلى زيادة إضافية في الأبعاد، وبالتالي فإمكانية الاستعادة من هذا النوع من الحالات غير متاحة.

9- تتطلب معالجة العينات المطابقة من حيث مقاومة أحمال الشد وغير المطابقة من حيث الأبعاد (زيادة في الأبعاد) خفض درجة حرارة حجرة الطباعة بمقدار نصف درجة وإعادة الطباعة والتقييم بمرجعية المنهجية المطورة في البحث الحالي.

## 12.المراجع:

- [1] Thabiso Peter Mpofo, Cephas Mawere and Macdonald Mukosera, (2014), **"The Impact and Application of 3D Printing Technology"**, International Journal of Science and Research, Vol 3, Issue 6, pp 2148-2152, ISSN (Online): 2319-7064.
- [2] Fredrick R, Ishengoma and Adam Bm Mtaho, (2014), **"3D Printing: Developing Countries Perspectives"**, International Journal of Computer Applications, Volume 104 – No 11, pp 30-33.
- [3] Eng-Ali Abdul-Hakim Mahmoud Al-Balawali, (2015), **"3D Printing"**, translation of a book freely available on 3dprintingindustry.com.
- [3].13 : المهندس علي عبد الحكيم محمود البلاوالي، "الطباعة ثلاثية الأبعاد"، ترجمة لكتاب متوفر بشكل مجاني على الموقع 3dprintingindustry.com، 2015.
- [4] M. Schmida, A. Amadoa and K. Wegener, (2015), **"Polymer Powders for Selective Laser Sintering"**, Department of Mechanical and Process Engineering, Swiss Institute of Technology, Switzerland.
- [5] A. Wegner, (2016), **"New Polymer Materials for the Laser Sintering Process: Polypropylene and Others"**, Ninth International Conference on Photonic Technologies.
- [6] Manfred Schmid, Rob Kleijnen, Marc Vetterli and Konrad Wegener, (2017), **"Influence of the Origin of Polyamide 12 Powder on the Laser Sintering Process and Laser Sintered Parts"**, Applied Sciences, 2017, 7, 462; doi:10.3390/app7050462.
- [7] Y Shi, Z Li, H Sun, S Huang and F Zeng, (2004), **"Effect of the Properties of the Polymer Materials on the Quality of Selective Laser Sintering Parts"**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L, Vol. 218, issue 3, pp. 247-252.
- [8] W.A.Y Yusoff and A.J Thomas, (2008), **"The Effect of Employing an Effective Laser Sintering Scanning Strategy and Energy Density Value on Eliminating "Orange Peel" on a Selective Laser Sintered Part"**, International Association for Management of Technology, IAMOT Proceedings.
- [9] Krassimir Dotchev and Wan Yusoff, (2009), **"Recycling of Polyamide 12 Based Powders in the Laser Sintering Process"**, Rapid Prototyping Journal, Vol. 15 Issue 3, pp. 192-203.

- [10] Sasan Dadbakhsha, Leander Verbelenb, Olivier Verkinderenc, Dieter Strobbea, Peter Van Puyveldeb and Jean-Pierre Krutha, (2017), **"Effect of PA12 Powder Reuse on Coalescence Behavior and Microstructure of SLS Parts"**, European Polymer Journal 92, pp. 250–262.
- [11] Sinterit sp, z o.o. d, **"Powder PA12; Product's Specification"**, PA12 Specification.pdf, [www.sinterit.com](http://www.sinterit.com).
- [12] Sinterit sp, z o.o. d, **"LISA SLS PRINTER; Product's Specification"**, [www.sinterit.com/wpcontent/uploads/2014/05/Sinterit\\_LISA\\_specification.pdf](http://www.sinterit.com/wpcontent/uploads/2014/05/Sinterit_LISA_specification.pdf).
- [13] Setaram Instrumentation, **"Termogravimetría-y-Calorímetro-diferencial-de-barrido-(Labsys-EVO-Setaram)%20(4).pdf"**, [www.setaram.com](http://www.setaram.com).
- [14] Jinan Kason Testing Equipment Co. Ltd, **"Material Testing Machine; Electric Universal Testing Machine Controlled by PC"**, <http://www.equi-lab.com.tn/pdf/WDW-100.pdf>.
- [15] ISO 527-2: 2012, (second edition 2012), The International Organization for Standardization, **"Plastics – Determination of Tensile Properties – Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics"**, Switzerland.